

**COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DE VARILLAS ½” GRADO 60 MEDIANTE  
ENSAYOS ACELERADOS DE CÁMARA DE NIEBLA SALINA**



**LUIS PABLO QUECEDO LLINÁS**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BARRANQUILLA-ATLÁNTICO**

**2020**

**COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DE VARILLAS ½” GRADO 60 MEDIANTE  
ENSAYOS ACELERADOS DE CÁMARA DE NIEBLA SALINA**

**LUIS PABLO QUECEDO LLINÁS**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO DE GRADO  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**Director**

**HEIDIS PATRICIA CANO CUADRO PhD**

**Codirector**

**MARIAN SABAU PhD**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BARRANQUILLA-ATLÁNTICO**

**2020**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Presidente de Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Barranquilla, \_\_\_\_\_ 2020**

### **Dedicatoria**

Este proyecto de grado se lo dedico a mis padres, que sin su ayuda y soporte no habría podido llegar a donde he llegado hoy en día y en general a toda mi familia que siempre han estado presente en mi desarrollo personal desde pequeño.

### **Agradecimientos**

Agradezco en primera medida a mi madre que siempre estuvo pendiente ante cualquier necesidad que se me presentó en el desarrollo de este proyecto de grado.

Agradezco de manera gigantesca a mis tutores Heidis Cano PhD y el ingeniero Marian Sabau PhD, los cuales siempre estuvieron prestos ante cualquier duda o inconveniente que se presentó, además de todo el interés porque este trabajo se realizara de la mejor manera. Así mismo, agradezco a la Universidad de la Costa y a la Universidad del Norte por los equipos e instalaciones facilitadas en este proceso, a los auxiliares de laboratorio de ingeniería mecánica en la Universidad del Norte y el de CITA en la Universidad de la Costa por toda su atención prestada.

### Resumen

En este trabajo se estudió el comportamiento que tienen las varillas de acero con respecto a la corrosión, en este caso la varilla de ½” grado 60. Para ello previamente se estudió la composición química de las varillas en las que se halló carbono, manganeso y cobre como los elementos con mayor predominancia. Se realizó una prueba acelerada en cámara de niebla salina en la cual se expusieron las barras por periodos de 1, 3 y 7 días, dicha prueba fue llevada a cabo bajo la normativa ASTM B-117:2019. Posteriormente se llevó a cabo la estimación de la velocidad de corrosión de las varillas cual fue realizada de acuerdo a la norma ISO 9226:2012 y se realizó la curva de velocidad de corrosión vs tiempo, notándose una gran velocidad de corrosión el primer día el cual decreció con el desarrollo de la prueba. Posteriormente se realizaron pruebas de caracterización, en los que se llevó a cabo el ensayo tracción en la máquina universal de ensayos y con los resultados se realizó la gráfica esfuerzo vs deformación, luego se realizó el ensayo de microscopia óptica en el cual se analizó la estructura interna de las varillas y donde se observó una microestructura de ferrita y perlita en los cortes transversales y longitudinales, además se realizó el ensayo de difracción de rayos X (DRX) con el que se realizó un difractograma de rayos X y se analizaron los picos característicos de los productos de corrosión, en dichos picos se encontró la lepidocrocita en los ángulos  $2\theta$  de  $15.12^\circ$  y  $2\theta$  es  $46.15$ , además de la akaganeíta en el ángulo  $2\theta$  es  $35.25$ . Por último, se realizó el ensayo de microscopía electrónica de barrido (SEM) con el cual se observó la morfología de los productos encontrados observándose lepidocrocita con forma granular, globular, laminar, de igual forma se observó akaganeíta con forma tubular. Se concluyó que la velocidad de corrosión tuvo valores elevados los primeros días los cuales disminuyeron a medida que las varillas ganaron masa, dichos valores indicaron que la corrosión en la varilla aumentaba con el paso de los días, pero a

un ritmo menor. Se encontró una coloración principalmente anaranjada típica de la presencia de lepidocrocita los tres días de estudio en las varillas. Además, se encontraron productos de corrosión que corresponden a ambientes con alto contenido de cloruros o en ambientes simulados como es el caso de la akaganeíta.

***Palabras clave:*** Corrosión, cámara de niebla salina, lepidocrocita, akaganeíta

### Abstract

In this paper was studied the behavior, regarding to the corrosion, in this case ½” grade 60 rebars were used. Prior this, the chemical composition of the rebars was studied, founding carbon, manganese and copper as the most predominant elements. An accelerated test in a salt spray chamber was realized, where the rebars were exposed for periods of 1, 3 and 7 days, the test was performed according to ASTM B-117:2019 standard. Afterward the corrosion rate of the rebars according to ISO 9226:2012 standard was estimated and the corrosion rate-time curve was made, noticing a high corrosion rate the first day which decreased with the course of the test .Also characterization test were performed, a tensile test was carried out in the universal testing machine then with the results, stress-strain graphic was realized, later an optical microscopy test was made and the inner structure of the rebar was analyzed observing a ferrite and perlite microstructure in the transverse and longitudinal cuts, besides an X-ray diffraction (XDR) test was carried out with which an X-ray diffractogram was made and the characteristic peaks of the corrosion products found were analyzed, in such peaks were found lepidocrocite in  $2\theta$  de  $15.12^\circ$  y  $2\theta$  es  $46.15$ , also in  $2\theta$  de  $35.25^\circ$  akageneite was found. Also, the scanning electron microscopy was performed with which the products morphology was observed, it was possible to see granular, globular and laminar formations of lepidocrocite, as well tubular formations corresponding to akageneite were found. It was concluded that the corrosion rate had high values the first days which decreased when the rebars get more mass, such values indicated that the corrosion was increasing with the course if the days, but in a lower rate. An orange coloration typical of the lepidocrocite presence in high chloride environments was found. Also, corrosion products corresponding to high chloride environments or simulated environments such the case of akageneite was found.



**KeyWords:** Corrosion, salt spray chamber, lepidocrocite, akaganeite.

## Contenido

Lista de tablas y figuras .....	12
1. Introducción.....	15
1.1. Descripción general del problema .....	17
1.2. Justificación .....	18
1.3. Objetivos.....	19
1.3.1. General .....	19
1.3.2. Específicos .....	19
1.4. Estado del arte.....	19
1.5. Marco Teórico.....	23
1.5.1. Corrosión.....	23
1.5.1.1. Clasificación de los procesos de corrosión.....	24
1.5.1.2. Corrosión atmosférica.....	25
1.5.1.3.1. Factores que afectan la corrosión atmosférica .....	25
1.5.1.3.2. Clasificación de la agresividad atmosférica.....	26
1.5.2. Acero .....	29
1.5.3. Productos de corrosión .....	30
1.5.3.1. Morfología de los productos de corrosión.....	32
1.5.4. Ensayo de cámara de niebla salina.....	33
1.5.5. Microscopía óptica .....	34
1.5.6. Ensayo de tracción .....	35
1.5.7. Análisis composicional .....	36
1.5.8. Microscopía electrónica de barrido (SEM) .....	36
1.5.9. Difracción de rayos X (DRX) .....	37
2. Parte experimental .....	38
2.1. Material de estudio .....	38
2.2. Ensayo de composición química. ....	39
2.3. Ensayo acelerado cámara de niebla salina. ....	40
2.4. Determinación de la velocidad de corrosión. ....	45
2.5. Ensayos de caracterización.....	46

2.5.1. Ensayo de tracción.....	46
2.5.2. Ensayo de microscopía óptica. ....	47
2.5.3. Ensayo microscopía óptica de barrido (SEM).....	49
2.5.4. Ensayo de difracción de rayos x (DRX).....	51
3. Resultados y discusión.....	51
3.1. Composición química.....	51
3.2. Propiedades estructurales. ....	52
3.3. Velocidad de corrosión.....	54
3.4. Coloración y textura. ....	56
3.5. Microestructura .....	59
3.6. Naturaleza de los productos de corrosión. ....	61
3.6.1. Difracción de rayos X (DRX).....	61
3.3.4.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM). ....	62
4. Conclusiones.....	65
5. Recomendaciones .....	67
6. Referencias .....	70

### Lista de tablas y figuras

#### Tablas

Tabla 1. Categorías de corrosividad atmosférica .....	27
Tabla 2. Rangos de velocidades de corrosión para probetas de acero al carbono .....	27
Tabla 3. Compuestos químicos encontrados en las capas de herrumbre .....	31
Tabla 4. Características varillas de ½ pulgada.....	39
Tabla 5. Especificaciones de sal industrial usada en prueba de cámara de niebla salina .....	40
Tabla 6. Composición química de varilla de ½ pulgada.....	50
Tabla 7. Resultados ensayo tracción a varilla corroída a los 7 días.....	53
Tabla 8. Resultados ensayo tracción a varilla no corroída.....	54
Tabla 9. Velocidad de corrosión con sus respectivas desviaciones estándar.....	56

#### Figuras

Figura 1. Microestructura distintos productos de corrosión .....	33
Figura 2. Cámara de niebla salina.....	34
Figura 3. Microscopio óptico.....	35
Figura 4. Cámara de niebla salina.....	41
Figura 5. Ubicación de acrílico en cámara de niebla salina.....	40
Figura 6. Ubicación de varillas de manera separada.....	40
Figura 7. Medición del pH de la solución.....	43
Figura 8. Extracción de varillas de cámara de niebla salina .....	44
Figura 9. Preparación de solución para limpieza de varillas .....	46
Figura 10. Ensayo de tracción en máquina universal de ensayos .....	47
Figura 11. Muestras longitudinales y transversales .....	48
Figura 12. Pulido de muestras.....	48
Figura 13. Probetas en proceso de endurecimiento .....	49
Figura 14. Ubicación de muestras en microscopio óptico de barrido.....	50
Figura 15. Gráficas esfuerzo vs deformación .....	53
Figura 16. Gráfica velocidad de corrosión vs tiempo .....	55
Figura 17. Varillas después de un día de exposición.....	57
Figura 18. Varillas después de tres días de exposición.....	58

Figura 19. Varillas después de 7 días de exposición .....	59
Figura 20. Ensayo microscopía óptica a cortes transversales y longitudinales. ....	60
Figura 21. Ensayo DRX a varilla de 7 días de exposición.....	60
Figura 22. Ensayo SEM primera zona de estudio .....	63
Figura 23. Ensayo SEM segunda zona de estudio .....	63
Figura 24. Ensayo SEM tercera zona de estudio .....	64

### **Glosario de símbolos y términos**

**Electrolito:** son sustancias compuestas de iones libres los cuales pueden ser conductores eléctricos.

**Maquinabilidad:** es una propiedad de los materiales que compara la facilidad de un material para ser cortados por arranque de viruta, es decir mediante el uso de segueta o una máquina de corte.

**Límite de elasticidad:** es la tensión máxima hasta la cual un material puede deformarse y recuperar su estado inicial sin sufrir deformaciones permanentes.

**Esfuerzo de fluencia:** es el esfuerzo en el cual con un leve aumento del esfuerzo el material empieza a deformarse plásticamente.

**Herrumbre:** es la capa de color rojizo que se forma en la superficie de un metal al darse inicio el proceso de oxidación.

**Hidrólisis:** es una reacción química en la que se descomponen sustancias orgánicas e inorgánicas completas en otras sustancias.

## 1. Introducción

La corrosión es una problemática que se presenta en casi todas las ciudades y zonas rurales del planeta, en unas con menos intensidad que en otras, debido a condiciones atmosféricas específicas de cada zona. Dado que el fenómeno de la corrosión se presenta en los materiales metálicos usados en todo tipo de estructuras, esto traerá repercusiones de tipo estructural a mediano y largo plazo, así como repercusiones de tipo monetario a sus propietarios.

En los países más desarrollados que poseen zonas costeras donde existe una gran cantidad de industrias, la corrosión puede llegar a tener costos tan elevados que se puede llegar a representar en un porcentaje del producto interno bruto del país, Baorong, et al. (2017) mostraron porcentajes de la corrosión en países como Estados Unidos donde en 1998 el costo llegó a ser 3,1% del PIB, teniendo un costo de 276 billones de dólares, además de que estos costos a nivel mundial rondaban entre 1 y 5% del PIB de cada país. Más recientemente ASEDUIS (2013) mencionan que la producción anual del acero en Colombia era cercana a 1500 millones de toneladas y que se corroe aproximadamente 300 millones de esta, lo que trae como consecuencias pérdidas aproximadas al país del 4% del PIB. En países del continente como Perú la corrosión generó pérdidas cercanas al 8% del PIB de dicho país para el año 2013.

En un país como China donde la industrialización se viene dando de manera acelerada en las últimas décadas se ha estimado hacia el año 2002 que el costo total de la corrosión en el sector de la construcción ha tenido un costo de 100 billones de RMB (moneda oficial de China), en el sector del transporte un costo de 30,39 billones de RMB y en la industria mecánica un costo aproximado de 51,24 billones de RMB (Baorong, et al. 2017, p. 3).

La corrosión no solo trae consecuencias estructurales o monetarias en países o ciudades, también trae consecuencias fatales como mencionan Xiaogang, et al. (2015) donde debido a la explosión de un oleoducto en la ciudad de Kaohsiung murieron 32 personas y dejando heridas a más de 321, a causa del deterioro por más de dos décadas del acero de las tuberías afectadas por el ambiente.

Con base a innumerables estudios y la evidencia visual, se puede establecer en qué momento un elemento de concreto reforzado en contacto con algún agente corrosivo ha iniciado un proceso de degradación trayendo como consecuencia un aumento de volumen de la barra de acero en su interior y que con el paso del tiempo la barra perderá las dimensiones originales, por consiguiente, la capacidad de soportar esfuerzos disminuirá lo que conlleva a afectaciones estructurales.

A partir de estas y otras consecuencias que puede traer el fenómeno de la corrosión, surge la necesidad de estudiar a fondo como se genera, como se desarrolla, que tan rápido se desarrolla, cuanto puede llegar a afectar un metal, para analizar posibles soluciones que se le pueda proveer a este y así detener o reducir el proceso corrosivo que se presenta. Estudiando este fenómeno y todas las consecuencias que traen a un metal, se puede conseguir que se eviten acciones correctivas y se realicen en mayor medida acciones preventivas de manera periódica según lo requiera la severidad del medio.



### **1.1. Descripción general del problema**

La corrosión es una problemática que se debe enfrentar a diario en el sector de la construcción puesto que ésta genera cuantiosas pérdidas económicas a personas, empresas, estado, “se estima que el costo global de la corrosión es de US\$2,5 billones, cifra equivalente a aproximadamente al 3,4% del producto interior bruto mundial (PIB)” (Koch et al., 2016, p.3). Estos costos en su mayoría se presentan en estructuras de concreto reforzado, las cuales poseen varillas de acero.

Las construcciones realizadas en zonas costeras están directamente afectadas por el ambiente salino que proviene del mar, una vez la estructura empieza a exponerse a tal ambiente iniciará un proceso de degradación progresivo que con el paso del tiempo, afectará en primera medida al concreto y posteriormente a la varilla de refuerzo que al corroerse tendrá un incremento de su volumen que será superior respecto al volumen original, lo que traerá consigo la afectación al concreto de recubrimiento de la estructura que se empezará a agrietar y perder material.

Esta problemática de la corrosión en las varillas, se debe analizar de tal forma que se conozca de manera anticipada como podrían llegarse a comportar tales varillas que están expuestas a los ambientes salinos de la costa Atlántica, con el fin de tomar las medidas preventivas o en última opción medidas correctivas para evitar mayores deterioros en estructuras. Por ello se genera el interrogante:

¿Cuál es el comportamiento a la corrosión de varillas ½” grado 60 en un ensayo acelerado de cámara de niebla salina?

## 1.2. Justificación

La costa Atlántica es una zona del país especialmente afectada por la corrosión ya que, entre otros factores, está en constante exposición al ambiente salino del mar Caribe. Es de conocimiento que estos ambientes agresivos producen un deterioro en las estructuras de concreto reforzado las cuales poseen en su interior distintos tipos de varillas a estudiar, estas al someterse a dicho ambiente y bajo la influencia de otros factores (alta relación A/C, grietas, porosidad alta, etc.) que afectan el concreto inician el proceso de corrosión. Dicho fenómeno, en el interior de la estructura, es de difícil determinación y no se hace notar hasta que la estructura empieza a perder partes de su sección.

Teniendo en cuenta lo anterior, hacer una evaluación de las varillas de ½” grado 60 permite conocer aspectos tales como la velocidad de corrosión que puede desarrollar la varilla con el fin de realizar correctas planeaciones de mantenimientos preventivos de las estructuras y minimizar las afectaciones a estas, lo cual es necesario para caracterizar esta problemática.

Así mismo se deben conocer aspectos como la pérdida de masa del material y los diferentes productos de corrosión que se forman en la varilla al someterse a estos ambientes corrosivos, debido a que estos pueden afectar propiedades de la varilla como la resistencia a la tensión.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Evaluar el comportamiento a la corrosión de las varillas ½” grado 60 mediante ensayos acelerados de niebla salina.

#### **1.3.2. Específicos**

- Caracterizar física, química y mecánicamente las varillas ½” grado 60 utilizadas en la construcción civil.
- Realizar ensayos acelerados de cámara de niebla salina a diferentes tiempos.
- Estimar la velocidad de corrosión de las probetas a ensayar.
- Caracterizar los productos de corrosión formados mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

### **1.4. Estado del arte**

Estudios realizados en diferentes lugares del mundo muestran diferentes tipos de resultado entre ensayos acelerados de cámara de niebla salina.

Papadopoulos et al., (2011) analizaron los efectos de la corrosión y la pérdida de resistencia de varillas de acero expuestas en distintas estructuras. Observaron que una barra de acero puede llegar a presentar una pérdida de masa de aproximadamente 79 veces más rápido en un ensayo acelerado con respecto a una muestra expuesta en una estructura al medio ambiente como las obtenidas de las estructuras estudiadas. Concluyeron que el ensayo acelerado simula buena manera la corrosión natural del acero de refuerzo una vez se quiebra el concreto de recubrimiento.

Wu, Lei, Chen, & Qiao, (2019) buscaron conocer el comportamiento a la corrosión del acero estructural Q235B y observar cómo se afectan las propiedades mecánicas del mismo. En el ensayo acelerado se realizó en un ambiente que contenía ácido clorhídrico con el fin de simular una lluvia ácida y así acelerar la velocidad de corrosión. Observaron que en ensayos acelerados la capa de óxido que se forma en el metal es más gruesa que un ensayo a intemperie debido a la gran concentración de cloruros y la formación de óxidos como la magnetita. Por otro lado, con las pruebas mecánicas encontraron que la corrosión tiene impacto en la elongación, un pequeño impacto en resistencia a la tensión y en el módulo elástico.

Almusallam, (2001) estudió el comportamiento mecánico que presentan las varillas de refuerzo cuando presentan un proceso corrosivo. Encontraron que una varilla No.2 al tener un grado de corrosión del 75% presenta un 22% de su capacidad original para resistir la carga última en un ensayo de tensión, respecto a una varilla que no ha presentado un proceso corrosivo y una varilla No.4 con un 80% de grado de corrosión presenta un 16% de su capacidad original para resistir una carga última. Concluyó que al incrementar los niveles de corrosión las varillas presentan un decrecimiento de su ductilidad, así mismo observó que al incrementar los niveles de corrosión las barras fallaban con bajos niveles de deformación a comparación con las varillas no corroídas.

Papadopoulos et al., (2007) evaluaron los efectos de la acumulación de corrosión en el comportamiento a tensión de dos tipos de barras de acero. Los investigadores observaron que a medida que los días de ensayo en la cámara de niebla salina aumentaron, los diámetros operativos de ambas barras disminuyeron de casi 12mm cada uno a 11,5mm y 11,4mm. Tras 90 días de exposición encontraron que el límite elástico de las barras resultó justo por encima del umbral que les dice la norma y con una tendencia de seguir disminuyendo a medida que la

corrosión se incrementa, este límite elástico disminuyó 8,9% y un 7,3% en ambas barras tras 90 días de realizado ensayo. Además, encontraron que las elongaciones de las barras disminuyeron un 23,4% y un 32,3% tras realizado el ensayo.

Artigas et al., (2015) buscaron crear una metodología la cual mediante ciclos de humedad y secado se simuló el comportamiento del acero en un ambiente marino. Encontraron que la velocidad de corrosión en las muestras estudiadas tendió a ser constante luego de 400 horas de ensayo lo cual comprobaron fue consistente con los tiempos reales de exposiciones. Tras el ensayo comprobaron que las muestras de aceros típicos estructurales tienden a tener una alta velocidad de corrosión respecto a las muestras de aceros de bajo carbono, debido a la presencia de cobre lo cual promueve la transformación de lepidocrocita en goethita. Al correlacionar el ensayo acelerado con el comportamiento a la intemperie, obtuvieron una ecuación con la cual verificaron que esta prueba simula el comportamiento de un ambiente marino para un tiempo mayor a 20 años de exposición en el acero de baja aleación estudiado.

Montoya, Díaz, Granizo, Fuente, & Morcillo (2013) realizaron un estudio con el fin de buscar información para incrementar la protección de los aceros usados a la intemperie, se usó un acero resistente a la intemperie ASTM A242 tipo 1 y un acero de carbono liso. Para esto realizaron pruebas aceleradas las cuales fueron llevadas a cabo usando tres métodos llamados Cebelcor, Kesternich, y Prohesion. Del estudio se concluyó que el método Cebelcor reproduce zonas de exposición parecidas a las rurales o urbanas, el método Kesternich reproduce zonas de alta polución y el método de Prohesion reproduce zonas marinas.

Austin, Lyons, & Ing, (2004) realizaron un estudio con un método donde se simule de manera acelerada el proceso corrosivo de varillas usadas en concreto reforzado. En este estudio se imprimió una corriente externa a unas varillas embebidas en concreto y se buscó simular un

proceso corrosivo acelerado de cloruros, método que fue confirmado como efectivo al observar que se logró conseguir una despasivación del metal, que le tomaría años en condiciones naturales, a solo unos cuantos días. El método usado en el estudio tiene ciertas ventajas sobre otras técnicas de corrosión acelerada es la habilidad de poder controlar la velocidad de corrosión, por ejemplo, al variar la resistividad del concreto esto puede contrarrestarse suministrando un voltaje mayor.

Liu et al., (2016) estudiaron el comportamiento de barras de acero de especificación HRB400 y barras de acero de baja aleación modificadas con 1.5Cr y 5Cr mediante ensayos acelerados. El ensayo luego de 8 días muestra corrosión localizada de manera predominante en las muestras. Para el acero HRB400 se observó la mayor velocidad de corrosión, seguida de la barra modificada con 1.5Cr y por último la barra modificada con 5Cr la cual mostró una velocidad de corrosión que fue la mitad del acero HRB400. Los productos de corrosión fueron analizados mediante DRX y se encontró que en los 3 tipos de acero había los mismos productos de corrosión, goethita, lepidocrocita y magnetita, sin embargo, cuando el contenido de Cr en las barras aumentó, el contenido de goethita también lo hizo caso contrario a la lepidocrocita la cual disminuyó.

Montoya, et al., (2007) evaluaron el comportamiento de dos aceros autoprotectores en los primeros estados de exposición simulando ambientes al que comúnmente se encuentran expuesto los aceros. Al momento de analizar la velocidad de corrosión después de los ensayos, se observó que tras 1200 horas de exposición la pérdida de masa en los aceros tiende a estabilizarse en dos de las tres muestras con el tiempo. En el análisis de los productos de corrosión mediante DRX se encontró que la lepidocrocita fue uno de los principales productos de corrosión encontrados en todas las muestras. También se encontró goethita producto que aparecía en las muestras en

función del tiempo de exposición debido al descenso de la lepidocrocita y la aparición de una herrumbre más protectora como lo es la goethita.

(Calero et al., 2017) buscaron mediante ensayos cíclicos de humedecimiento y secado simular una atmósfera salina para conseguir la formación de múltiples capas de corrosión de una placa de acero al carbono, mediante las observaciones con SEM se encontraron montículos de corrosión agrietado, en la misma observación encontraron formaciones globulares compuestas por láminas de lepidocrocita. En otras zonas encontraron lepidocrocita laminar en forma de pluma, la cual desarrolló posteriormente cristales de goethita tipo varilla y agregados de cristales en forma de cigarro, típicas de la akaganeíta. Analizaron que una de las principales diferencias entre este tipo de ensayo acelerado y exposiciones al aire libre es la frecuente ausencia de estratos de óxido entre las distintas capas que se pueden crear y lo que trae como consecuencia el consumo completo de la akaganeíta.

## **1.5.Marco Teórico**

### **1.5.1. Corrosión**

La corrosión es un proceso natural mediante el cual un metal se deteriora debido a una reacción que se produce entre el metal y el medio ambiente en que está expuesto.

En el libro titulado Control de la corrosión estudio y medida por técnicas electroquímicas se afirma que: “en un sentido más amplio la corrosión es un fenómeno por medio del cual los sistemas químicos expresan su tendencia hacia un estado de equilibrio estable” (Gonzales, 1989, p. 1).

En el concreto reforzado la corrosión generalmente se produce de manera uniforme en las varillas, debido a que cuando se presenta la carbonatación del concreto este se despasiva

llegando a valores de  $\text{pH} < 9$  y la varilla se corroe de manera similar como si estuviera expuesta a la atmósfera.

### **1.5.1.1. Clasificación de los procesos de corrosión**

#### **a) Corrosión directa**

La corrosión directa o también llamada corrosión seca, por gases calientes, por alta temperatura, se produce en el momento “el metal reacciona directamente con el agente agresivo ( $\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , etc.), afectando de manera similar a toda la superficie metálica” (Morcillo y Gonzales, 2018, p. 33).

#### **b) Corrosión electroquímica**

La corrosión electroquímica o también llamada corrosión acuosa o húmeda, se produce cuando “el metal se halla en contacto con electrolitos (agua, soluciones salinas, ácidos, bases, etc.) (Morcillo y Gonzales, 2018, p. 33), en el caso del concreto reforzado, la varilla es el conductor metálico y la capa acuosa que se presenta sobre el concreto es el electrolito. En este tipo de corrosión el ataque se presenta únicamente en zonas anódicas de la superficie metálica y no presenta afectaciones por igual en toda la superficie.

En el control de la corrosión se afirma que: “en la corrosión electroquímica la superficie metálica es sede de dos reacciones de electrodo, que ocurren en lugares diferentes, ánodos y cátodos locales y que, consideradas conjuntamente, constituyen el proceso global de corrosión” (Gonzales, 1989, p. 23).

En este tipo de corrosión metálica se presenta un proceso redox, debido al funcionamiento de pilas electroquímicas microscópicas, lo que conlleva a que en la superficie del metal se produzcan dos reacciones de electrodo:



- La reacción anódica de oxidación:  $M \rightarrow M^{z+} + ze^{-}$
- La reacción catódica de reducción:  $Ox^{+} + e^{-} \rightarrow Red$

donde M es el metal, z es la valencia y  $Ox^{+}$  una especie química contenida en el electrolito con altas posibilidades de reducirse (Red).

#### 1.5.1.2. Corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica en ambientes secos tiene efectos menores en los metales, en cambio en ambientes húmedos tiene gran relevancia. En estos ambientes húmedos el electrolito puede estar en forma de una película de humedad considerablemente delgada (pocas monocapas), o puede tener una película acuosa (de centenas de micrómetros de espesor), esto cuando el metal aparenta estar parcialmente mojado (Morcillo y Gonzales, 2018, p. 35).

Morcillo y Gonzales (2018) afirman:

El proceso de corrosión atmosférica es suma de los procesos parciales (individuales) de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal. Las precipitaciones acuosas (lluvia, nieve o niebla) y la condensación de humedad por cambios de temperatura (rocío) son sin duda, los principales promotores de la corrosión en la atmósfera. (p.36)

##### 1.5.1.3.1. Factores que afectan la corrosión atmosférica

Existen varios factores, entre los más importantes está la temperatura del ambiente, precipitaciones, viento, humedad relativa, entre otros. Dichos factores serán descritos a continuación.

- Temperatura: cuando se presentan altas temperaturas en el ambiente, la humedad sobre la superficie metálica se evapora, la concentración de oxígeno desciende, así mismo como

la concentración de otros gases corrosivos. De igual forma se presentan cambios en las propiedades protectoras en las capas de los productos de corrosión. Cuando la temperatura es menor al punto de congelación del agua, no se presenta corrosión debido a que el hielo se considera un electrolito pobre (Navarrete et al., 2007, p.31).

- Precipitaciones: las precipitaciones se podrían considerar de manera positiva en los efectos de la corrosión atmosférica debido a que elimina en gran manera los contaminantes atmosféricos en las superficies metálicas (Navarrete et al. 2007, p. 28). Aunque con mayores periodos de precipitaciones la humedad del ambiente aumenta.
- Viento: los vientos en zonas cercanas a las costas agitan el mar y transportan partículas de agua de mar y es la fuerza responsable de la salinidad presente en atmosferas marinas (Morcillo y Gonzales, 2018, p. 86). Así mismo cabe resaltar que dependiendo de la dirección y velocidad del viento se van a dispersar contaminantes en el aire.
- Humedad relativa: la humedad relativa es la que afecta la frecuencia y duración de los periodos de lluvia, rocío o niebla, momentos durante los cuales las superficies metálicas aparecen visiblemente mojadas y las micropilas de corrosión desarrollan su actividad. En muchas ocasiones en humedades relativas por debajo de 60-80% la corrosión es despreciable en ciertos metales (Morcillo y Gonzales, 2018, pp. 36, 37).

#### **1.5.1.3.2. Clasificación de la agresividad atmosférica**

La norma ISO 9223:2012 establece en total seis categorías de corrosividad para cada uno de los cuatro metales referencia (acero al carbono, zinc, cobre y aluminio), dichas categorías se observan en la Tabla 1.

Tabla 1

*Categorías de corrosividad atmosférica*

<b>Categoría</b>	<b>Corrosividad</b>
C1	Muy baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5	Muy alta
CX	Extrema

*Nota: Fuente: Tomado de: Norma ISO 9223:2012*

Según la norma ISO 9223:2012 los valores de velocidades de corrosión para el acero al carbono para cada categoría son los siguientes mostrados en la Tabla 2. Dichos valores fueron obtenidos a partir de la exposición de probetas por un tiempo de 1 año.

Tabla 2

<b>Categoría</b>	<b>Unidades</b>	<b>Velocidad de corrosión</b>
C1	µm/a	≤1,3
C2	µm/a	1,3 -25
C3	µm/a	25 - 50
C4	µm/a	50 - 80

C5	µm/a	80 – 200	<i>Rangos de velocidades de corrosión para probetas de acero al carbono</i>
CX	µm/a	200 - 700	

*Nota: Fuente: Tomado de: Norma ISO 9223:2012*

Las categorías de corrosividad indican el grado de severidad que tiene un medio ambiente para con un metal. La categoría C1 generalmente hace referencia a oficinas, museos, colegios, así como desiertos y Antártida. La categoría C2 hace referencia a almacenes, cuartos, coliseos, así como desiertos y zonas subárticas. La categoría C3 hace referencia a ambientes encontrados en plantas de procesamiento de alimentos, como las áreas urbanas, áreas costeras con baja deposición de cloruros, zonas tropicales y subtropicales, así mismo con atmosferas de baja polución. La categoría C4 hace referencia a ambientes industriales, áreas urbanas con polución, áreas industriales, áreas costeras sin aerosol marino fuerte, al igual que zonas tropicales y subtropicales. Las categorías C5-Cx hacen referencias a minas, cavernas para procesos industriales, espacios no ventilaos en zonas tropicales, así mismo áreas industriales, zonas costeras y áreas de playa con mucha niebla, zonas tropicales y subtropicales, atmosferas con alta polución o alto efectos de cloruros.

### **1.5.2. Acero**

En la guía y tablas técnicas de los aceros se afirma que: “el acero es una aleación de hierro con carbono en una proporción que oscila entre 0,03% y 2% (Peña y Rendón, 2013, p.23).

Los aceros se clasifican en 4 categorías aceros al carbono, aceros aleados, aceros de baja aleación y alta resistencia y los aceros de alta aleación – inoxidable.

#### **a) Aceros al carbono**

Los aceros al carbono contienen diferentes cantidades de carbono, menos de 1,6% de manganeso, 0,6% de silicio y 0,6% de cobre. Los aceros al carbono se clasifican en:

- Aceros de medio carbono, que tienen de 0,25% a 0,6% de carbono.
- Aceros de alto carbono, que tienen de 0,6% a 2,11% de carbono (Peña y Rendón, 2013, p.26).

#### **b) Aceros aleados**

Se consideran aquellos aceros que poseen además de hierro y carbono, otros elementos que se añaden para aumentar su resistencia. Los aceros aleados se clasifican en:

- Aceros estructurales, que tienen de 0,25% a 6% de producto de aleación.
- Aceros para herramientas, son aceros usados para moldear metales y no metales.
- Aceros especiales, son los aceros inoxidables y tienen un contenido de Cromo mayor a 12% (Peña y Rendón, 2013, p.26).

**c) Aceros de baja aleación y alta resistencia**

Son aceros más baratos que los aleados, pero estos reciben un tratamiento con el fin de obtener una resistencia mayor a la del acero al carbono. Estos aceros son usados en vagones de mercancía (Peña y Rendón, 2013, p.p 26, 27).

**d) Aceros de alta aleación**

Son aceros que contienen cromo, níquel, y otros elementos que los mantienen brillantes y resistentes a la corrosión a pesar de que estar en presencia de dichos agentes. Se clasifican en Ferríticos, Martensíticos, Austeníticos y Dúplex (Peña y Rendón, 2013, p.27).

**1.5.3. Productos de corrosión**

Los productos de corrosión se presentan como óxidos, hidróxidos, oxihidróxidos y sustancias cristalinas amorfas, estas sustancias se pueden originar desde el mismo producto (productos endógenos) o desde la atmósfera (productos exógenos).

La Tabla 3 muestra los más frecuentes productos encontrados en las capas de acero expuestas a la atmosfera.

Generalmente el hidróxido de hierro se forma en soluciones neutras a básicas, cuando se presentan soluciones de acidez media la *lepidocrocita* ( $\gamma\text{-Fe}^{3+}\text{O(OH)}$ ) se transforma en *goetita* ( $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O(OH)}$ ). En ambientes marinos principalmente se encuentra *akaganeíta* ( $\beta\text{-Fe}^{3+}\text{O(OH,Cl)}$ ) debido a que el electrolito contiene cloruros. La magnetita, se puede generar por reducción del hidróxido de hierro en poca presencia de oxígeno, así mismo puede generarse por la oxidación del hidróxido de hierro o por especies férrico-ferrosas intermedias como el óxido verde. En presencia de ambientes industriales y urbanos los compuestos más comúnmente encontrados son la lepidocrocita, Goetita y Magnetita (Morcillo et. Al, 2011, p.p 427, 428, 429).

Tabla 3

*Compuestos químicos encontrados en las capas de herrumbre*

<b>Categoría</b>	<b>Fórmula</b>
<b>Óxidos</b>	
Hematita	$\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$
Maghemita	$\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Ferrihidrita	$\text{Fe}_5\text{HO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
<b>Hidróxidos</b>	
Hidróxido de hierro	$\text{Fe}(\text{OH})_2$
Oxihidróxido de hierro	$\text{Fe}(\text{OH})_3$
Goetita	$\alpha - \text{FeOOH}$
Akaganeíta	$\beta - \text{FeOOH}$
Lepidocrocita	$\gamma - \text{FeOOH}$
Oxido / hidróxido de hierro	$\delta - \text{FeOOH}$
<b>Otros</b>	
Cloruro de hierro (II)	$\text{FeCl}_2$
Cloruro de hierro (III)	$\text{FeCl}_3$
Sulfato de hierro (II)	$\text{FeSO}_4$
Sulfato de hierro (III)	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$

*Nota: Fuente: (Morcillo et. Al, 2011, p. 427)*

### **1.5.3.1. Morfología de los productos de corrosión**

Los productos de corrosión pueden llegar a tomar distintas formas como se observa en la Figura 1, y se pueden presentar como cristales arenosos, estructuras florales, estructuras globulares tipo algodón, estructuras aciculares, cristales en forma de cigarro, entre otras.

En la Figura 1, se puede observar en (A) y (B) estructuras típicas de la lepidocrocita, en (C) una estructura típica de la Goetita al igual que en (D) y en (E) y (F) estructuras típicas de Akaganeíta.

En el caso de magnetita se puede llegar a encontrar como regiones planas oscuras, muchas veces con discos circulares los cuales no son fáciles de encontrar.



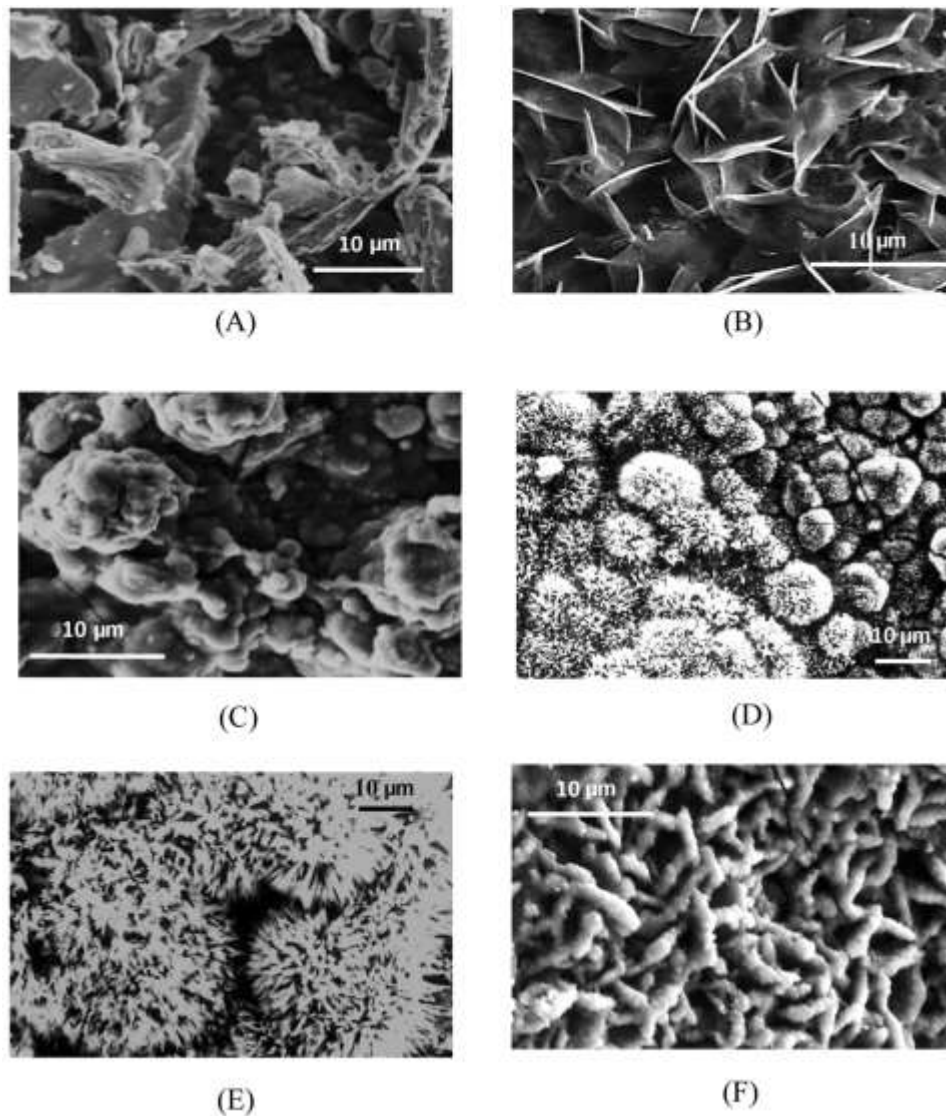


Figura 1. Microestructura distintos productos de corrosión (Fuente: Tomado de: Morcillo, et al, 2011, p. 430)

#### 1.5.4. Ensayo de cámara de niebla salina

Este ensayo está basado en la norma ASTM B117:2019, y busca reproducir de manera controlada ambientes corrosivos, para obtener posteriormente información sobre resistencias a la corrosión de diferentes tipos de metales.

En muchas ocasiones estas predicciones del comportamiento de la corrosión en metales no son precisas debido a las innumerables variables que puede haber en un ambiente corrosivo.

Así mismo estos resultados del comportamiento de la corrosión van a depender en gran cantidad de los especímenes estudiados, el criterio de evaluación escogido, el control de las variables de operación de la prueba, entre otros factores.

Para la realización de este ensayo se requiere que la cámara de niebla salina tenga una serie de componentes como se observa en la Figura 2 y consiste en una cámara de niebla, un depósito de solución salina, un suministro de aire comprimido, una o varias boquillas atomizadoras, soportes para muestras, provisiones para calentar la cámara y medios necesarios de control (ASTM B117: 2019).

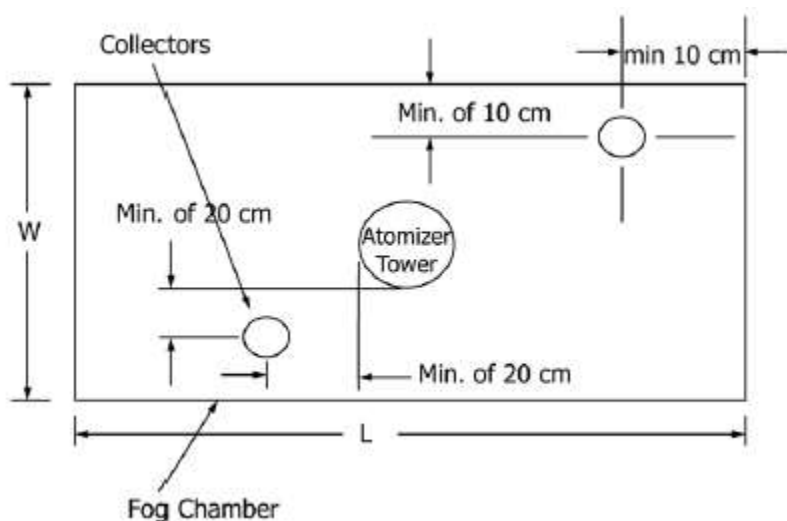


Figura 2. Cámara de niebla salina (Fuente: Tomado de: norma ASTM B117).

### 1.5.5. Microscopía óptica

Este ensayo si se realiza de manera cuidadosa y adecuada es una excelente técnica de estudio de la morfología de los productos de corrosión, la cual además de permitir conocer su espesor, grado de porosidad y compacidad, mediante el uso de luz polarizada puede observarse capas de distinta composición (Morcillo y Gonzales, 2018, p.p 77, 78).

Así mismo se puede analizar la estructura de la muestra con el fin de observar la presencia de los diferentes constituyentes de una barra de acero como lo son la perlita, bainita, austenita, cementita, ferrita, entre otros. A partir del análisis con el microscopio óptico se puede llegar a determinar el tamaño del grano, la forma, su distribución, las fases, etc.

Dicho ensayo se realiza mediante el uso de un microscopio óptico como el observado en la Figura 3, en donde se ubicarán las muestras previamente tratadas y por medio del microscopio óptico y un programa de recuperación de las imágenes se analizará la estructura de la muestra.



*Figura 3. Microscopio óptico (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo)*

### **1.5.6. Ensayo de tracción**

El ensayo de tracción es uno de los más realizados en el estudio del comportamiento mecánico de los materiales. A partir de este ensayo mecánico se busca conocer principalmente cual es la relación que existe entre un esfuerzo que se le aplica al material y su deformación consecuente. Dicho ensayo se basa en someter la probeta a una carga axial que se incrementa gradualmente hasta que la probeta llegue a su falla. Este ensayo tiene entre sus fines analizar

propiedades típicas de una varilla como la carga de fluencia, el esfuerzo de fluencia, carga máxima, esfuerzo máximo y elongación.

Este ensayo de tracción se realiza en una máquina universal de ensayos, en la que se busca conocer las propiedades mecánicas iniciales de una probeta sin corroer y luego de exponer otra probeta al proceso corrosivo y ensayarla. A partir de estos análisis se pueden realizar comparaciones con el fin de analizar porcentajes de pérdida de cada una de estas propiedades y los efectos que puedan traer en el uso típico que se les da a estas varillas de acero.

### **1.5.7. Análisis composicional**

La realización de este ensayo permite conocer la composición química de la barra de acero, en la cual se obtendrán los compuestos en sus porcentajes correspondientes.

A partir de conocer la composición química de la muestra se puede llegar a determinar qué tipo de acero es la varilla. A partir de conocer qué tipo de acero es la varilla, se pueden determinar por consiguiente sus principales propiedades, así como sus principales aplicaciones. Además, conociendo los porcentajes de otros compuestos usados en la varilla se pueden deducir algunas características que le proveen cada uno de estos compuestos a la varilla.

### **1.5.8. Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

El ensayo de SEM o también conocido como microscopía electrónica de barrido es un ensayo ampliamente usado en el estudio de la corrosión, que permite entre otros conocer la morfología de los productos formados en la superficie metálica.

En el SEM:

Un fino haz de electrones, emitido por un filamento, se acelera mediante un potencial eléctrico. Dicho haz se enfoca sobre la muestra mediante un sistema de

lentes electromagnéticas. La interacción del haz de electrones con la superficie del sólido origina electrones secundarios, electrones Auger, electrones retrodispersados, rayos X, etc., que pueden ser empleados para obtener información diversa (morfología, fases cristalográficas, composición elemental, etc.) de la muestra examinada. Los rayos X originados son característicos de los elementos presentes en la muestra y proporcionan información sobre la composición elemental. (Morcillo y Gonzales, 2018, p.78).

Este ensayo SEM presenta algunas ventajas en el estudio de corrosión en metales como lo son: tener gran profundidad de campo, se puede obtener una imagen tridimensional de los productos de corrosión estudiados, gran resolución, posibilidad de procesar la imagen (Morcillo y Gonzales, 2018, p.78).

Este ensayo se lleva a cabo con microscopio electrónico de barrido, el cual consta de:

- Un programa de procesamiento de las imágenes obtenidas.
- Un sistema de vacío.
- Un tubo de rayos catódicos.
- Una unidad para la detección de señales y de amplificación.
- Una unidad tipo óptico electrónico que genera el haz de electrones.
- Un soporte para la ubicación de la muestra con diferentes grados de movimientos.

#### **1.5.9. Difracción de rayos X (DRX)**

El ensayo de DRX o también conocido como difracción de rayos X es un ensayo ampliamente usado en la identificación de los productos de corrosión en metales, principalmente las fases cristalinas de estos productos.

Sin embargo, a medida que aumenta el número de fases de herrumbre presentes, su identificación resulta más difícil debido a que las fases cristalinas son por lo general inferior al 100%, por la presencia de fases amorfas en la herrumbre (Morcillo y Gonzales, 2018, p.73).

Morcillo y Gonzales (2018) señalan entre las principales ventajas del ensayo DRX, su sencillez, alta confiabilidad en la identificación de los productos y escaso costo de realización. Entre las principales desventajas del ensayo mencionan la necesidad de tener gran cantidad de muestra generalmente algunos gramos y debido a la separación de las muestras del metal se priva en muchos casos del análisis de partículas delgadas. Los productos de corrosión amorfos y cuasiamorfos generan difícil identificación debido a que no producen picos definidos y dan difratogramas intermedios entre productos amorfos y cristalinos. Productos como la magnetita y maghemita son difícilmente identificables el uno del otro debido a su estructura similar y parámetros de red parecidos a los de temperatura ambiente. Así mismo el análisis cuantitativo es largo y complicado, obligando a tener modelos de tamaño de partícula y orientaciones preferenciales.

## **2. Parte experimental**

### **2.1. Material de estudio**

Para la realización del estudio se utilizaron diez varillas de ½” grado 60, las cuales al momento de su obtención se buscó la mayor limpieza de las mismas con el fin de obtener la mayor fiabilidad en los datos obtenidos en las pruebas a realizar posteriormente.

Estas varillas utilizadas en el estudio son de gran aplicación en construcciones de concreto reforzado, principalmente empleadas en viviendas, edificios, puentes, carreteras, etc. Razón por la cual se decidió el uso de este tipo de varillas para su análisis en el presente estudio. Las características de las varillas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

*Características varillas de ½ pulgada*

<b>Diámetro</b>	<b>Área(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso(kg/m)</b>	<b>Largo(m)</b>
<b>nominal(mm)</b>			
12,5	42,43	0,9	6

*Nota: Fuente: Elaboración propia Fuentes Luis Pablo Quecedo.*

Estas varillas fueron recortadas con unas medidas definidas. Se recortaron en 9 partes iguales de 10cm y dos se recortaron con dimensiones de 40cm, se marcaron con una pintura resistente a ambientes agresivos de color amarillo con el fin de diferenciar las varillas que serían retiradas al primer día, tercer y séptimo día de exposición para posteriormente ser envueltas con film transparente en toda su superficie, esto con el fin de evitar el mayor contacto de la varilla con el ambiente y evitar posibles brotes corrosivos.

## **2.2. Ensayo de composición química.**

Previo a la realización de todas las pruebas concernientes, se buscó conocer la composición química de las varillas usadas en el estudio, prueba que se realizó en la Universidad de Medellín mediante el uso de un espectrómetro Bruker Q8 Magellan. La prueba se realizó con el uso de dos materiales de referencia BAS 433/1, BAS 434/1 y con unas condiciones de análisis en donde la humedad fue 49% y una temperatura de 23,2°C.

Para llevar a cabo el estudio se recortó una muestra de 2cm de largo del sobrante de la varilla original que se recortó y dicha muestra fue envuelta para posteriormente ser enviada al laboratorio de la Universidad anteriormente mencionada

### 2.3. Ensayo acelerado cámara de niebla salina.

Esta prueba fue llevada a cabo en una cámara de niebla salina Atlas modelo SF, Figura 4. Para este ensayo se utilizó un tipo de sal industrial cuyas características se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

*Especificaciones de sal industrial usada en prueba de cámara de niebla salina*

Componente	Porcentaje
Cloruro de sodio (NaCl)	99,6% Max
Otras sales (Mg, Ca, K, SO4)	0,3% Max
Solubles	0,1% Max
Humedad máxima	2% Max

*Nota:* Fuente: Elaboración propia Fuentes Luis Pablo Quecedo.

Este ensayo se basa en el uso de la cámara de niebla salina en la cual se lleva a cabo una simulación de un ambiente corrosivo como es el salino.





Figura 4. Cámara de niebla salina (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

El primer paso que se realizó fue ubicar un acrílico dentro de la cámara de niebla salina de tal manera que este debía quedar en un ángulo de  $30^\circ$  grados, como lo indica la norma ASTM B117-16, respecto a la vertical como se observa en la Figura 5. Posteriormente se procedió a tomar una varilla y ubicarla en el acrílico con el fin de observar si ésta se mantenía fija y no hubiese ningún tipo de movimiento o pérdida del ángulo de inclinación.

Una vez se comprobó que las varillas quedaban de manera fija en el acrílico se procedió a terminar de ubicar el resto de varillas de manera cuidadosa, cada una de estas se colocó de manera intercalada en las perforaciones del acrílico, separándolas cada una de las 9 varillas por un orificio con el fin de que cada varilla no tuviese ninguna influencia en la varilla contigua

Figura 6.



Figura 5. Ubicación de acrílico en cámara de niebla salina (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).



Figura 6. Ubicación de varillas de manera separada (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

Una vez se comprobó la correcta ubicación de las varillas en la cámara de niebla salina, se realizó un breve cálculo para conocer la cantidad de sal que se debería usar en el reservorio de acuerdo a las dimensiones del mismo y según la norma ASTM B-117:2019, en la que se indica que deben ser disueltos en 5 gr de sal cada 95 gr de agua. Se determinó una cantidad de sal de 10,26kg de NaCl para los 195000 mililitros de capacidad del reservorio. La temperatura de realización del ensayo fue de 26°C.

Para dicha prueba y con ayuda del técnico se determinó que económicamente y por la cantidad de varillas a ensayar no era necesario el llenado total del reservorio para la cantidad de días en los cuales se llevaría a cabo la prueba, por lo que se decidió solo llenar el reservorio a la mitad de su capacidad lo cual indicaba que la cantidad de NaCl usada para la prueba se reduciría a la mitad siendo 5,13kg.

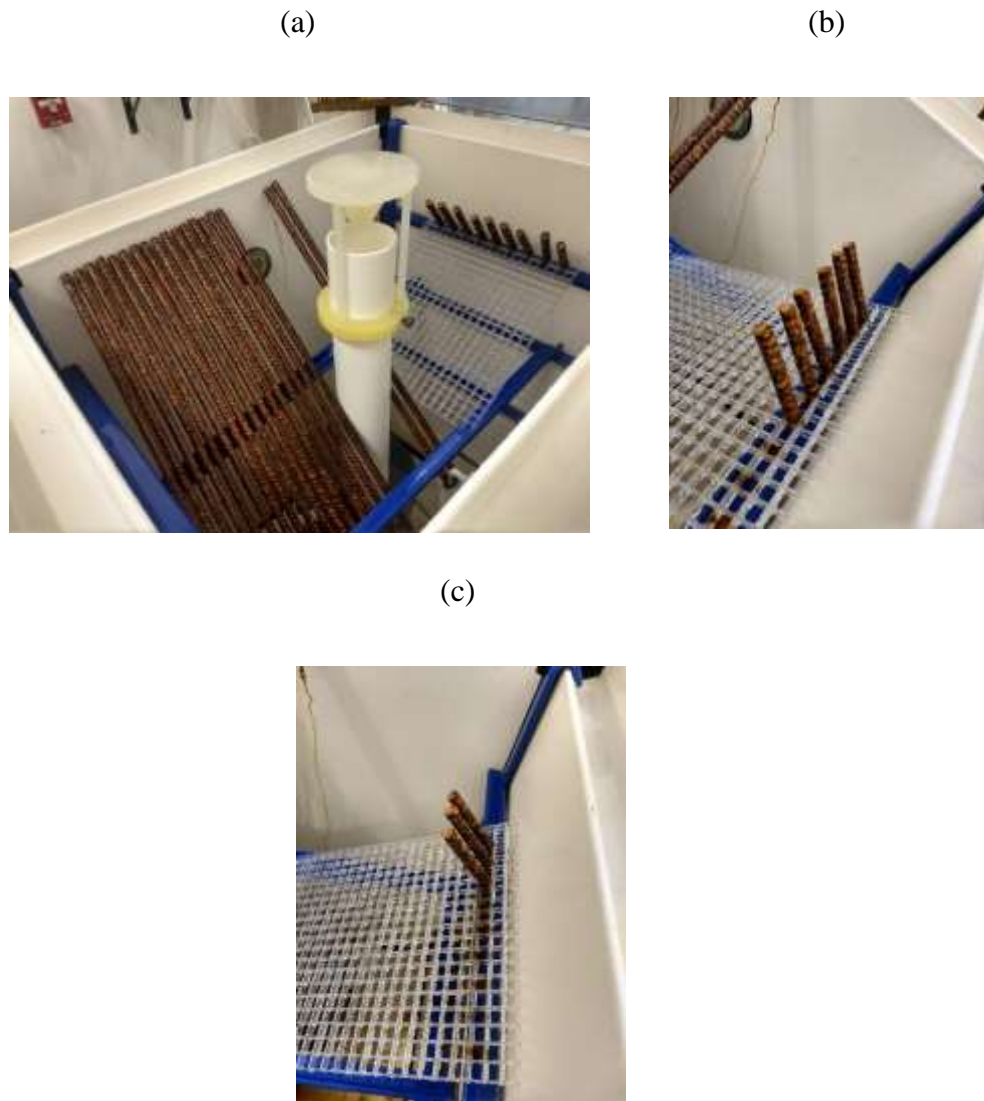
Una vez preparada la solución se procedió a realizar una prueba para medir el pH de la misma con un medidor portátil ProfiLine pH 3110, prueba que debía arrojar un pH de la solución entre 6,5 y 7,2 como lo indica la norma ASTM B-117:2019 y se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Medición del pH de la solución (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

Posteriormente se procedió a realizar una prueba de calibración de la cámara de niebla salina de manera manual en la cual se iba a ir variando la presión de la cámara con el fin de obtener una mayor o menor cantidad humedad dentro de la misma. Para esto se ubicaron dos probetas, de acuerdo a la norma ASTM B-117:2019, a las cuales se les colocaron dos embudos respectivamente en la parte de arriba de cada una. Se procedió a colocar una presión tentativa de la cámara y se dejó funcionar por una hora. Transcurrida la hora se observaron las probetas, dichas probetas deberían contener una cantidad de entre 1 a 2 ml de solución, pero estas contenían una cantidad superior y se volvió a realizar la prueba con una presión inferior. Este procedimiento se llevó a cabo hasta que se consiguió obtener una cantidad que fuese aceptada por la norma para la correcta realización de la prueba, dicho procedimiento tomó alrededor de 6 horas por lo que se decidió que la prueba tuviese inicio al día siguiente.

Llegado el día del inicio de la prueba se ubicaron todas las varillas en su posición y se dio inicio a la prueba a las 3:00p.m y se realizaron las extracciones previstas de tres varillas al primer, tercer, y séptimo día de comenzada la prueba, como se observa en la Figura 8.



*Figura 8.* Extracción de varillas de cámara de niebla salina. La figura (a) muestra las varillas al primer día de exposición, la figura (b) corresponde al tercer día de exposición y la figura (c) corresponde al séptimo y último día de exposición (*Fuente:* Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

Cada vez que se extrajeron las tres varillas en los días establecidos se envolvieron con film transparente para evitar que se perdiese el producto de corrosión formado y de igual forma

evitar que la varilla estuviese en contacto con el ambiente con el fin de determinar de manera posterior la velocidad de corrosión de cada una de las varillas en estudio.

#### **2.4. Determinación de la velocidad de corrosión.**

La velocidad de corrosión se determinó según la Norma ISO 9226:2012. Para llevar a cabo los procedimientos necesarios para determinar estos valores, se pesaron cada una de las varillas antes y después de la realización de la prueba de cámara de niebla salina. Dicha prueba se realizó con 2 varillas por cada tiempo de exposición.

Para determinar la velocidad de corrosión según la norma ISO 9226:2012 se tomaron 500 ml de ácido clorhídrico (HCl), 3,5gr de hexametilentetramina ((CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>N<sub>4</sub>) y 1L de agua destilada.

Una vez preparada la solución se adicionó esta en varios recipientes de vidrio como se observa en la Figura 9, se procedió a tomar las varillas y colocarlas en cada uno de los recipientes y se cronometró un tiempo de 10 minutos para posteriormente retirar, limpiar, pesar y registrar el nuevo valor del peso de cada varilla. Este proceso se repitió hasta que el cambio en el peso de las varillas tuviese un porcentaje entre 1 y 3% con el fin de obtener unos valores de velocidades de corrosión fiables, dicho proceso tuvo que ser repetido hasta una quinta vez con el fin de obtener un cambio de peso de las varillas que estuviera en anterior porcentaje.



Figura 9. Preparación de solución para limpieza de varillas (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

## 2.5. Ensayos de caracterización.

### 2.5.1. Ensayo de tracción.

Para la realización del ensayo de tracción se tomaron 2 varillas de 40cm de largo, una varilla sin exponer a la cámara de niebla salina y la otra expuesta a los 7 días en la cámara de niebla salina con el fin de analizar diferencias en la integridad del metal.

La prueba fue llevada a cabo en las instalaciones de la Universidad del Norte con la colaboración del técnico encargado, basándose para su realización en la normativa ASTM E8 /E8M – 16 para la ubicación de las probetas en las mordazas dejando una longitud libre de 200mm y se realizó en la máquina universal de ensayos de marca SHIMADZU modelo UH 100<sup>a</sup>, véase Figura 10. Se procedió a colocar la varilla en posición para empezar la prueba y se llevó a cabo la realización de la prueba, la cual fue desarrollando la gráfica de esfuerzo-deformación para cada una de las dos varillas en ensayo.



Figura 10. Ensayo de tracción en máquina universal de ensayos (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

### 2.5.2. Ensayo de microscopía óptica.

Para la realización de este ensayo se tomaron dos muestras de 2 cm de largo de varilla no corroída.

Inicialmente se recortó una de las varillas de manera longitudinal y transversal, véase Figura 11, con el fin de ver posteriormente la estructura de las varillas, el corte fue realizado mediante el uso de un equipo de corte metalográfico refrigerado marca Buehler modelo ABRASIMET 2.

Una vez se tuvieron los cortes, se procedió a realizar un proceso de pulido con las lijas #100, 240, 320, 400, 600 y 2000. Las varillas se pasaron por cada una de las lijas con el fin de eliminar imperfecciones superficiales en las caras de las varillas.

Posteriormente mediante el uso de pulidora de paño doble, marca Buehler, modelo ECOMET 6 junto con abrasivo llamado MicroPolish Alumina y agua destilada se buscó eliminar las imperfecciones de las superficies de ambas varillas, véase Figura 12, dichas muestras

tuvieron un tiempo de pulido de 30 minutos, el cual es el tiempo estimado para obtener una superficie lisa y sin imperfecciones.



*Figura 11.* Muestras longitudinales y transversales (*Fuente:* Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).



*Figura 12.* Pulido de muestras (*Fuente:* Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

Una vez se realizó el pulido de ambas muestras se procedió a realizar el montaje en el microscopio óptico marca Zeiss y referencia GmbH y se procedió a observar la estructura de cada



una de las muestras. Dichas muestras se analizaron a 200, 500 y 1000x con el fin de tener diferentes detalles en cada una de las imágenes que se pudieron obtener.

### 2.5.3. Ensayo microscopía óptica de barrido (SEM).

Para la realización de este ensayo se tomaron 3 cortes de cada uno de los días de exposición en la cámara de niebla salina, a estos se les realizaron los cortes correspondientes para ser colocados en los recipientes en donde serán fijados posteriormente.

De igual forma que en el ensayo de microscopía óptica, una vez se tuvieron los cortes se procedió a realizar un proceso de pulido con las lijas mencionadas en el ensayo de microscopía óptica. De igual forma lo que se busca obtener es una superficie sin imperfecciones superficiales. Para hacer la fijación de las muestras se usó una resina la cual se le aplicaba un endurecedor, las proporciones usadas fueron de cada 100gr de resina se debían usar 20g de endurecedor. De esta forma en un recipiente metálico se mezclaron ambos y se procedió a ubicar de manera centrada las varillas en cada probeta, véase Figura 13 y dichas muestras se dejaron endurecer por 24 horas. Cada una de las muestras fue marcada con diferentes colores para una mejor diferenciación de cada una de las varillas con cada día de exposición.



Figura 13. Probetas en proceso de endurecimiento (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

Pasado el tiempo especificado se procedió a realizar la extracción de las varillas y a cada una se le realizó el proceso de pulido como en los ensayos previos, cada una se pulió por media hora con el fin de reducir imperfecciones en la superficie.

Realizado estos procedimientos se procedió a llevar las muestras al microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo 5600 y ubicarlas de manera centrada en el microscopio, véase Figura 14, dicho lugar debe estar completamente limpio de polvo o pelusas para evitar interferencias en los resultados, por lo que se verificó que todo el interior del microscopio estuviera en óptimas condiciones.

Una vez puestas las muestras se procedió a encender el computador el cual posee el programa base que toma las lecturas del microscopio y se realizó la prueba con ejecución del técnico encargado en la temática.



*Figura 14.* Ubicación de muestras en microscopio óptico de barrido (*Fuente:* Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

#### **2.5.4. Ensayo de difracción de rayos x (DRX).**

Este ensayo fue realizado para identificar las fases cristalinas de los productos de corrosión y fue llevado a cabo en la Universidad Antonio Nariño usando un difractómetro BRAUKER con un ánodo de radiación de cobre, con una velocidad de escaneo de 0,3°/min, un rango  $2\theta$  de 5° a 90°.

### **3. Resultados y discusión**

#### **3.1. Composición química.**

En la Tabla 6, se observan los resultados de composición química del metal. Se observa que el porcentaje de carbono es de 0,26 lo cual indica que es un acero de medio carbono. Las propiedades de los aceros que se encuentran bajo esta categoría son: ductilidad, buena soldabilidad, buena maquinabilidad, pero no son buenos para la fatiga. Sus principales aplicaciones son el acero estructural, ejes, piezas forjadas, entre otros.

Así mismo, se observa que el porcentaje de manganeso es de 1,10, dicho componente se usa para desoxidar y aumentar la capacidad de endurecimiento del acero.

De igual forma se puede observar que el porcentaje de cromo es 0,10, este elemento ayuda a evitar la corrosión, así como aumenta la resistencia a altas temperaturas del acero. De igual forma en porcentajes bajos como el obtenido el cromo incrementa ligeramente la dureza de la barra e incrementa la resistencia al desgaste.

Así mismo, se observa que el porcentaje de silicio es 0,14, dicho elemento aumenta la resistencia de los aceros bajos en carbono, así mismo ayuda a elevar el límite elástico de los aceros.

El contenido de cobre de 0,234 en la barra de acero, trae como beneficio principal mejorar la resistencia a la corrosión cuando el contenido de acero se encuentra entre valores de 0,15 y 0,30%.

Tabla 6

*Composición química de varilla de ½ pulgada*

<b>Elemento</b>	<b>%p/p</b>	<b>Elemento</b>	<b>%p/p</b>
<b>Carbono (C)</b>	<b>0,262</b>	Cobalto (Co)	0,011
<b>Silicio (Si)</b>	<b>0,141</b>	Niobio (Nb)	0,014
<b>Manganeso (Mn)</b>	<b>1,101</b>	Plomo (Pb)	0,0024
Fósforo (P)	0,016	Antimonio (Sb)	0,0071
Azufre (S)	0,0077	Estaño (Sn)	0,016
<b>Cromo (Cr)</b>	<b>0,108</b>	Tantalio (Ta)	0,0078
Molibdeno (Mo)	0,014	Titanio (Ti)	0,0020
Níquel (Ni)	0,084	Vanadio (V)	0,0032
<b>Cobre (Cu)</b>	<b>0,234</b>	Tungsteno (W)	0,0040
Aluminio (Al)	<0,00020	Zirconio (Zr)	0,00094
Arsénico (As)	0,0070	Calcio (Ca)	0,00035
Boro (B)	<0,00010	-----	-----

*Nota: Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo.*

**3.2. Propiedades estructurales.**

La Figura 15 muestra el comportamiento del metal una vez realizado el ensayo a tracción, para la muestra corroída y la muestra no corroída. Se observa que existe un leve decrecimiento en el límite de elasticidad de la varilla corroída respecto a la varilla no corroída. Además, se observa que la zona de fluencia es mínima o inexistente en ambas varillas. Seguido a esto en ambas gráficas se observa un endurecimiento por deformación, teniendo una pendiente más evidente en su primer tramo y luego tomando una pendiente más plana hasta el punto de esfuerzo máximo que corresponde a 589,16 MPa en la varilla corroída (a) y de 597,37 MPa en la varilla

no corroída (b). Por último, se observa que la zona de estricción o zona de tensión post-máxima en ambas muestras se presenta de manera corta o casi inmediata hasta la fractura.

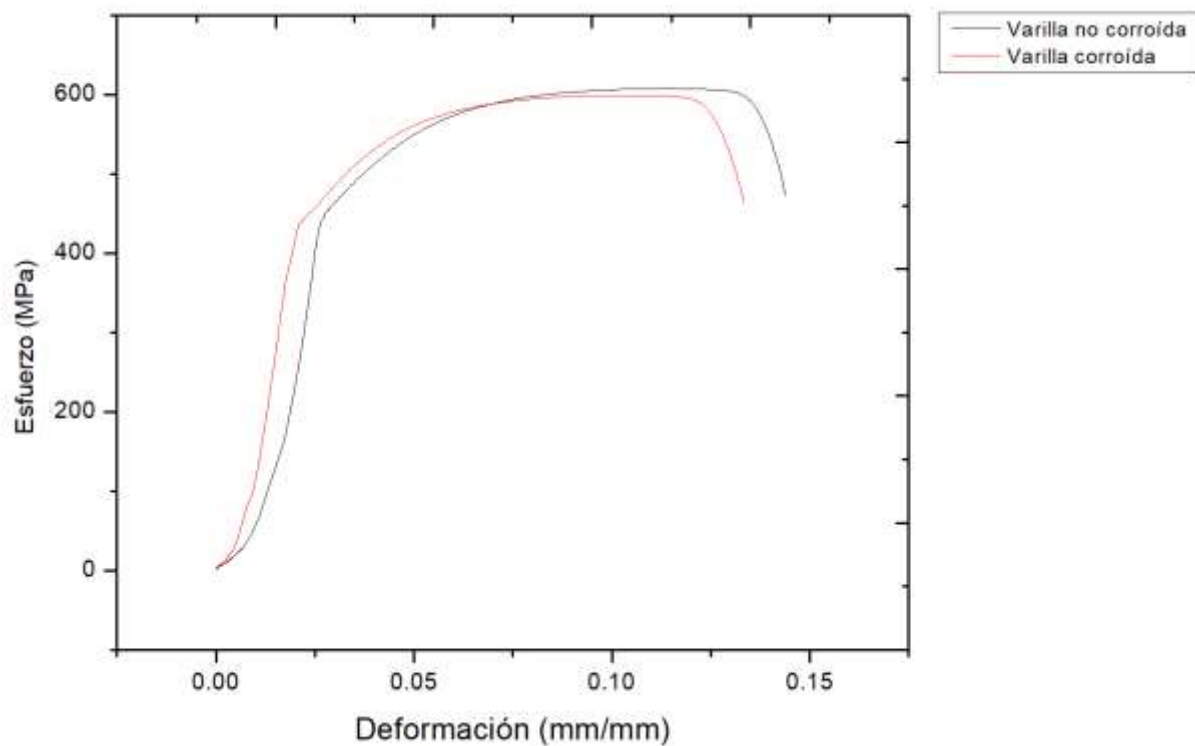


Figura 15. Gráficas esfuerzo vs deformación (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

En las Tablas 7 y 8 se muestran los valores mecánicos presentados para la varilla corroída y la no corroída.

Tabla 7

*Resultados ensayo tracción a varilla corroída a los 7 días*

Carga de fluencia (N)	Esf. De fluencia (MPa)	Carga máxima (N)	Esf. Máximo (MPa)	Elongación (%)
55368,34	439,21	76001,54	589,16	14

Nota: Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo.

Tabla 8

*Resultados ensayo tracción a varilla no corroída*

<b>Carga de fluencia (N)</b>	<b>Esf. De fluencia (MPa)</b>	<b>Carga máxima (N)</b>	<b>Esf. Máximo (MPa)</b>	<b>Elongación (%)</b>
57074,70	442,44	77060,66	597,37	15

*Nota: Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo.*

De acuerdo a los valores obtenidos en la Tabla 7 se observa que la varilla corroída presenta un esfuerzo de fluencia menor con respecto a la varilla no corroída, lo que indica que la varilla corroída con un esfuerzo menor comenzó a deformarse en estado plástico que la varilla no corroída. De igual forma presenta una carga máxima menor a la presentada en la varilla no corroída, lo cual indica que ésta llegó a la fractura de manera anticipada respecto a la varilla no corroída.

Las gráficas de esfuerzo deformación obtenidas para las muestras corroídas y no corroídas tuvieron resultados similares a los de (Wu et al., 2019) en donde encontraron que el acero corroído tuvo un estado de fluencia menor en comparación a los aceros estudiados sin corroer. Además, encontraron que la corrosión afecta la elongación del acero, lo cual coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio ya que la elongación obtenida en la varilla corroída fue inferior a la de la varilla no corroída.

### **3.3. Velocidad de corrosión.**

La gráfica de velocidad de corrosión vs tiempo se puede observar en la Figura 16. En el primer día de exposición la velocidad de corrosión tiene valores altos que coinciden con el desarrollo de la capa de herrumbre que se forma en las muestras y con el transcurso de los días la velocidad de corrosión tiende a decrecer, esto debido a que la capa de herrumbre empieza a

cubrir toda la superficie del metal y de igual forma su espesor es mayor, por lo que con el transcurrir del tiempo de exposición la velocidad de corrosión empieza a estabilizarse y con ello la pendiente de la gráfica.

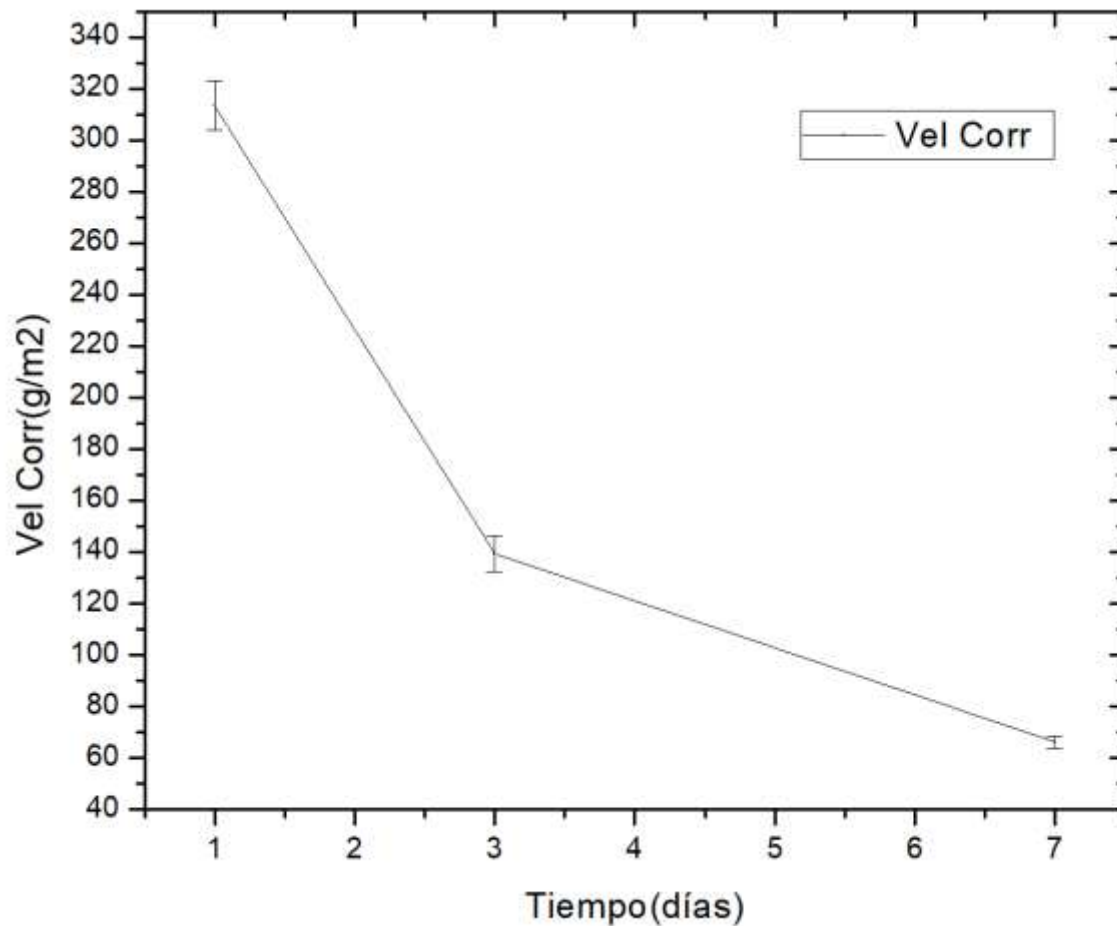


Figura 16. Gráfica velocidad de corrosión vs tiempo (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

La Tabla 9 muestra los valores promedios de velocidad de corrosión para dos varillas a los 1, 3 y 7 días y se puede observar como con el desarrollo de la prueba las muestras presentan una progresiva ganancia de masa lo cual conlleva a grandes velocidades de corrosión iniciales para posteriormente disminuir con el transcurrir de los días y esto se debe a que la corrosión formada en la varilla sigue en aumento, pero a un ritmo menor. Luego de la realización de

limpieza y decapado de las muestras se observa en la Tabla 9 una pérdida de masa inicial que supera 1 gramo para posteriormente ir disminuyendo con el transcurrir de los días de exposición, dicha disminución de la pérdida de masa en las muestras indica que la capa de herrumbre creada en el metal no era muy gruesa, podría ser muy porosa y con grandes agrietamientos la cual la hace susceptible a desprendimientos del metal.

Tabla 9

*Velocidades de corrosión promedios con sus respectivas desviaciones estándar.*

Días	Ganancia de masa (gr)	Desviación estándar	Velocidad de corrosión (gr/m <sup>2</sup> *día)	Desviación estándar	Pérdida de masa (gr)	Desviación estándar
1	0,2	0,1	313,54	9,57	1,28	0
3	0,3	0	139,30	7,07	1,67	0,08
7	0,9	0	66,13	2,52	1,85	0,07

*Nota:* Dicha prueba fue realizada con dos varillas por cada día de exposición, por lo que se obtuvieron valores promedios tanto de la ganancia de masa, pérdida de masa de las varillas como su velocidad de corrosión. Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo.

### 3.4. Coloración y textura.

Con el desarrollo de la prueba en la cámara de niebla salina cada una de las varillas fue desarrollando una capa de herrumbre característica del proceso corrosivo del metal. En la Figura 17, se puede observar cómo después de transcurridas las primeras 24 horas de exposición en la cámara de niebla salina se empieza a notar los primeros brotes de herrumbre, la cual toma un color anaranjado.





*Figura 17.* Varillas después de un día de exposición (*Fuente:* Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

Una vez completado el tercer día de ensayo se puede observar en la Figura 18, que la capa de herrumbre se ha incrementado y empieza a cubrir la mayoría de la superficie de las varillas. En (b) se pueden observar las varillas del presente estudio y en (a) las varillas de un estudio que se realizaba en paralelo, dichas varillas tienen las mismas características a las mostradas en (b) por lo que se exponen para una mejor observación de la capa de herrumbre.

(a)



(b)



Figura 18. Varillas después de tres días de exposición (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

En el séptimo y último día de exposición no se llega a evidenciar un gran aumento a la vista de la capa de herrumbre en la superficie de la cada varilla, véase Figura 19, además tampoco se evidencia ningún tipo de variación de la coloración o textura de la capa.

(a)

(b)



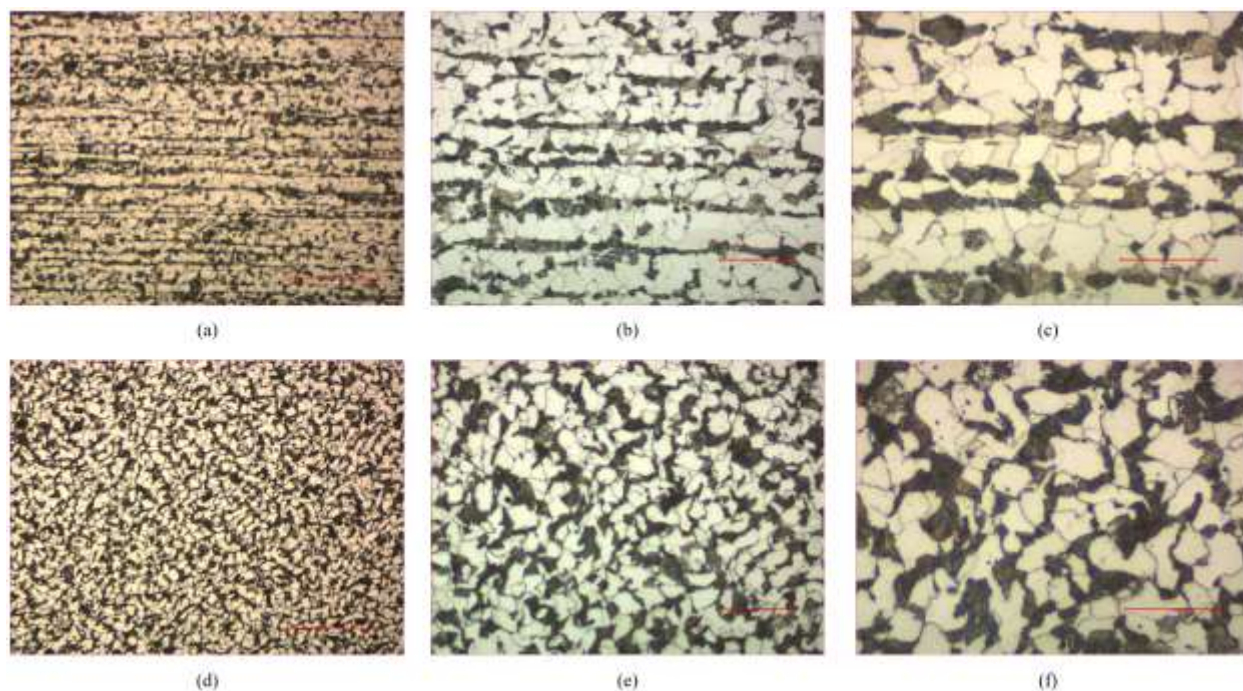
*Figura 19. Varillas después de 7 días de exposición (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).*

El color anaranjado típico que se observa en las Figuras 17, 18 y 19, es característico del producto de corrosión correspondiente a la lepidocrocita, cual se presenta en la región más externa de la capa de herrumbre. Dicho producto es el primero en formarse en atmósferas marinas o ambientes marinos simulados y siempre se forma en las primeras horas o días de exposición.

### **3.5. Microestructura.**

La Figura 23, muestra la imagen microscópica de corte longitudinal (a, c y e) y transversal (b, d y f) del acero que es objeto de estudio. Respecto al corte longitudinal se observa la dirección de la laminación del acero.





*Figura 20.* Ensayo microscopía óptica a cortes transversales y longitudinales. En dichas imágenes se puede observar el corte longitudinal (a, b y c) y el transversal (d, e y f) de la muestra estudiada a zooms de 200, 500 y 1000x con escalas de 300μm, 100μm y 40 μm correspondientemente (*Fuente:* Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

Se observa en la Figura 20, una microestructura principalmente de ferrita y perlita. A partir de la micrografía realizada se logra observar la fase de ferrita rica en hierro la cual se contrasta en claro y la fase de perlita que contiene carburos de hierro en una matriz de ferrita en contraste oscuro. Como lo dice León-Bello, Amaya-Malpica, (2008) se observan dos fases distintas y dichas fases son conductoras de electricidad, en el momento que exista la presencia de un electrolito se creará de inmediato un par galvánico entre los granos. La distinta distribución del arreglo de los granos en la estructura permitirá la presencia de un mecanismo heterogéneo de la corrosión que fijará las reacciones anódicas y catódicas en sitios definidos de la superficie metálica, siendo la ferrita más anódica que la perlita.

### 3.6. Naturaleza de los productos de corrosión.

#### 3.6.1. Difracción de rayos X (DRX).

Los resultados de la prueba de identificación de los productos de corrosión para una varilla expuesta a 7 días en la cámara de niebla salina se observan en la Figura 21. Se muestra en el difractograma un poco de ruido debido a las condiciones de análisis y además que se analizaron sobre un metal. Aun así, se logra contrastar la presencia de algunos picos característicos tal como la lepidocrocita que se presenta a un ángulo  $2\theta$  de  $15.12^\circ$ , tal como lo reportó (Montoya et al., 2013) en sus investigaciones. Un pico con ángulo  $2\theta$  de  $46.15^\circ$ , también indica la presencia de lepidocrocita. Este producto que se considera cristalino aparece en la mayoría de las atmósferas y es el primero en formarse en un metal, ocupa la capa externa de la herrumbre y se forma cuando el oxígeno del aire se disuelve en una película ácida que se encuentra en el metal lo que genera la aparición de la lepidocrocita. Dicho producto es altamente soluble incluso con capas de agua con bajo pH, lo cual puede conducir la aparición de oxihidróxidos férricos al momento de secarse, los cuales pueden generar goetita.

Otro pico a resaltar es el del ángulo  $2\theta$  de  $35.25^\circ$  característico del producto de corrosión conocido como akaganeíta y también evidenciado en estudios como los de (Liu et al., 2016) y (Montoya et al., 2013). Este producto es típico de atmósferas marinas donde prevalecen los cloruros. La akaganeíta generalmente se forma cuando se acumulan iones de cloruro en el electrolito sobre el metal, lo que conduce a formarse el cloruro ferroso ( $\text{FeCl}_2$ ) el cual hidroliza el agua dando lugar a un apreciable aumento de la acidez del electrolito.

Para la aparición de dicho producto deben existir dos condiciones ambientales, que son una humedad relativa media anual del 80% o superior y una velocidad media anual de depósito de ion cloruro en torno a  $60 \text{ mg Cl}^-/\text{m}^2\text{día}$  o superior (Morcillo, Gonzáles, 2018, p.138).

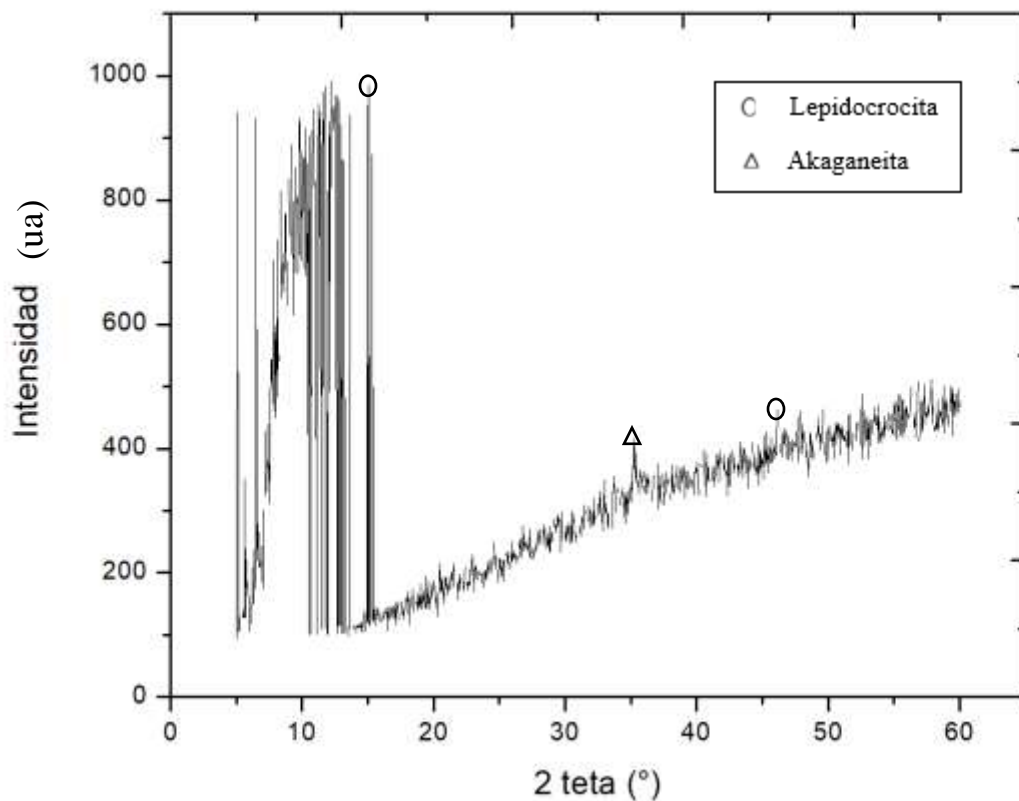


Figura 21. Ensayo DRX a varilla de 7 días de exposición (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

### 3.3.4.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Se observa en la Figura 22, que a 7 días de exposición empiezan a aparecer formaciones globulares que tienen una forma hemisférica de tipo granular (a), las cuales corresponden a la lepidocrocita y se observan unas más agrupadas que otras. De igual forma se observan formaciones tubulares (b) en forma de varillas las cuales corresponden a la fase de herrumbre conocida como Akaganeíta.

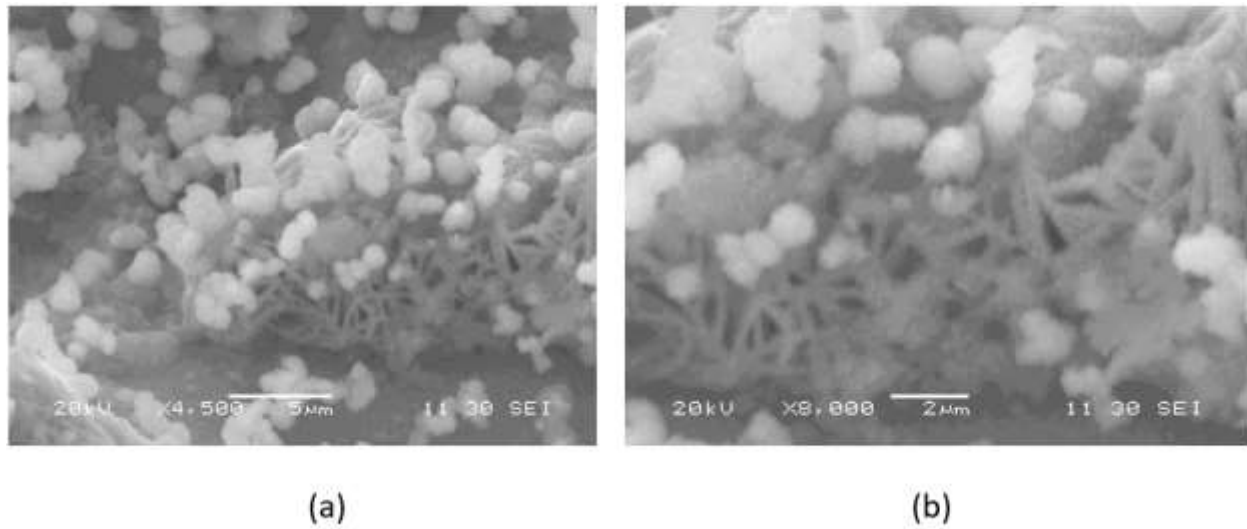


Figura 22. Ensayo SEM primera zona de estudio (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

En otra zona de estudio, como se muestra en la Figura 23, se observan brotes globulares correspondientes a lepidocrocita de tipo granular (a), además de observarse pequeños brotes en forma de varillas o espinas (b) correspondientes a la lepidocrocita.

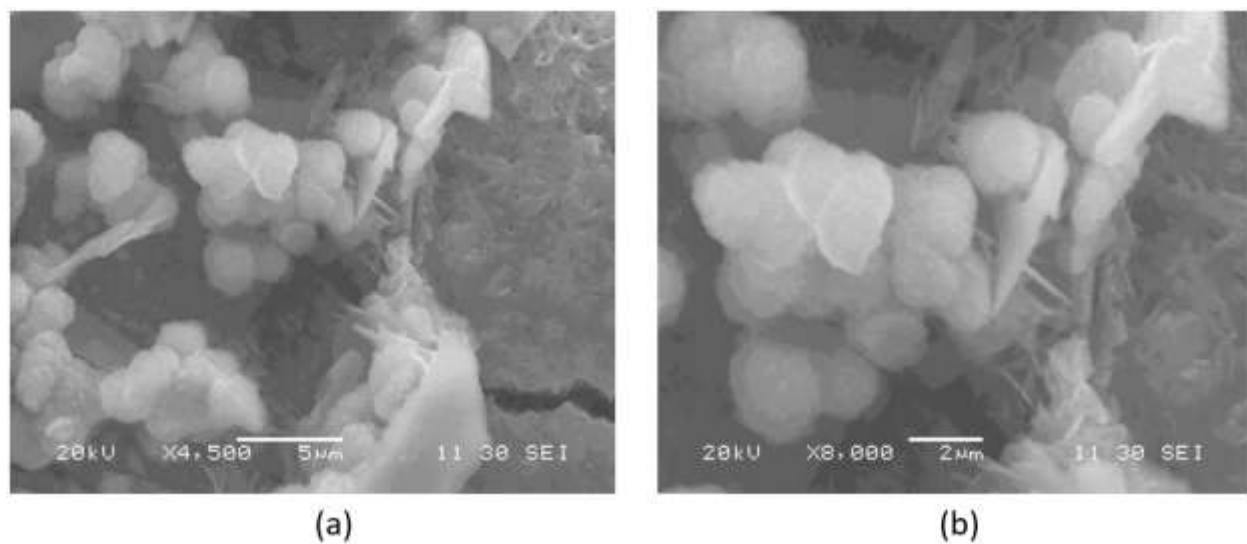


Figura 23. Ensayo SEM segunda zona de estudio (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

Así mismo, en una última zona de estudio tal como se muestra en la Figura 24, se observa más claramente la fase de herrumbre correspondiente a formaciones de lepidocrocita laminar con forma de nidos de pájaro (a) y (b).

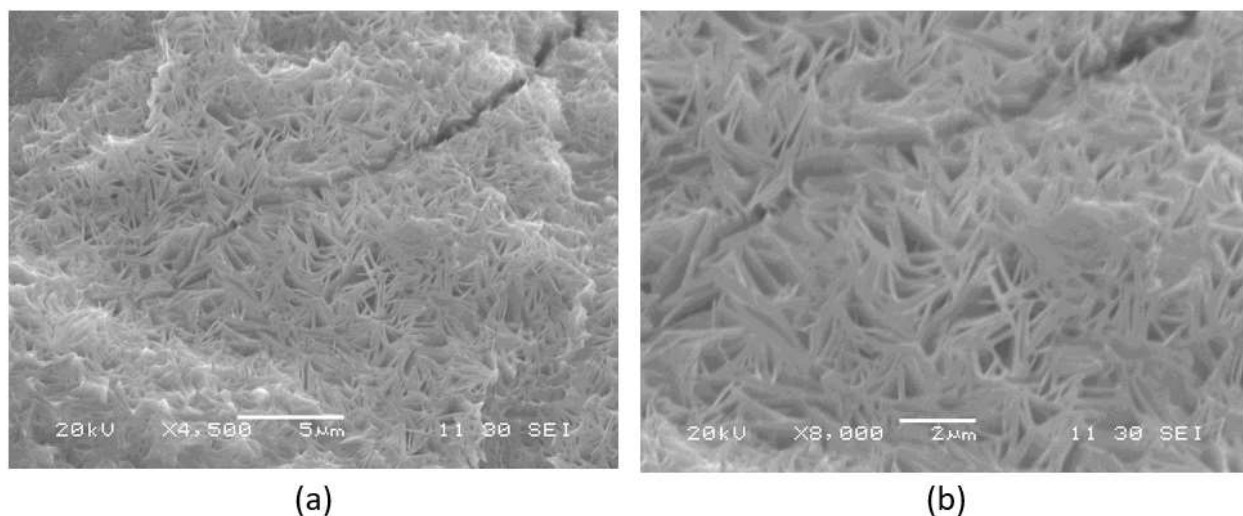


Figura 24. Ensayo SEM tercera zona de estudio (Fuente: Elaboración propia Luis Pablo Quecedo).

En términos generales a los 7 días de exposición se puede establecer que se ha formado lepidocrocita y akaganeíta, productos de corrosión en el caso de la lepidocrocita que se forma en las primeras horas de exposición de un acero a un ambiente corrosivo, el cual se encuentra en la parte externa de la capa de herrumbre. Dicho producto puede transformarse en goetita, pero para que se consiga su transformación deben presentarse ciclos de humedad/secado razón por la cual no se desarrolló dicho producto. Por otro lado, la akaganeíta conocida por su aparición en ambientes con altas concentraciones de cloruros, se forma tras la aparición de la lepidocrocita en la superficie metálica, la cual impide que llegue y se concentre  $O_2$  en la superficie del metal, dando como consecuencia la aparición de la akaganeíta. Dicho producto se desarrolla en la capa interna de la capa de herrumbre.



#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se estudió el comportamiento a la corrosión que presenta una varilla de ½” grado 60 en un ensayo acelerado de cámara de niebla salina.

Para ello se analizó la composición química de las varillas la cual arrojó porcentajes de carbono de 0,262%, de manganeso de 1,101%, de cobre de 0,234% como los tres componentes con mayor porcentaje en la composición de las varillas. Dichos porcentajes indicaron que se trataba de un acero de medio carbono con propiedades como la ductilidad, buena soldabilidad. Por otra parte, el contenido de manganeso ayuda aumentar la capacidad de endurecimiento del acero. Y por último el contenido de cobre mejora la resistencia a la corrosión cuando el contenido de acero se encuentra entre valores de 0,15 y 0,30%.

Luego del estudio de las propiedades estructurales del acero se observó que la varilla corroída presenta un esfuerzo de fluencia 439,21MPa, valor menor en relación con el obtenido para la varilla no corroída 442,44MPa, lo que indicó que la varilla corroída presentó deformaciones plásticas para un esfuerzo de fluencia menor que la varilla no corroída. De igual forma la varilla corroída presentó un esfuerzo máximo menor 589,16MPa, valor menor en relación con el obtenido para la varilla no corroída 597,37MPa, lo que indicó que la varilla corroída presentó menor capacidad de resistir las deformaciones en la etapa de endurecimiento respecto a la varilla no corroída.

De acuerdo a la gráfica de la velocidad de corrosión, se encontró que esta presentó valores elevados los primeros días de exposición los cuales decrecieron a medida que las muestras presentaron una ganancia de masa. Los valores de velocidad de corrosión indicaron que la corrosión en las varillas con el transcurrir de los días aumentaba, pero con un ritmo menor.

De acuerdo a la coloración y textura de las varillas estudiadas se presentó una coloración anaranjada típica de la presencia de la lepidocrocita tanto el primer, tercer como el séptimo día de estudio.

En el análisis metalográfico se encontró la estructura típica del acero, observándose una microestructura principalmente de ferrita y perlita.

La naturaleza de los productos de corrosión indicó en el ensayo DRX la presencia de lepidocrocita y de akaganeíta, esta última solo se presenta en ambientes con alto contenidos de cloruros o ambientes simulados con altos contenidos de cloruros como es el caso del presente estudio.

Por último, en el ensayo SEM, se evidenció la presencia de lepidocrocita en la capa de herrumbre, la cual presentó formaciones globulares con forma hemisférica de tipo granular. Así mismo, se encontró lepidocrocita en formaciones laminares con forma de nido de pájaro. Y de igual forma se encontró akaganeíta en formaciones tubulares con forma de varillas o agujas.

De acuerdo al comportamiento que presentaron las barras de acero, en un elemento estructural de una construcción típica no se presentarían en principio afectaciones visuales evidentes debido a que los tiempos de exposición de las barras no fueron más prolongados a una semana, además de que este tipo de elemento estructural esta embebido en el concreto estructural. En caso tal que la estructura sea sometida a esfuerzos iguales a los de diseño se podrían presentar afectaciones más relevantes en los elementos estructurales que posean dicho refuerzo debido a que las barras presentaron un decrecimiento en sus propiedades estructurales. Dichas afectaciones podrían llegar a ser grietas pequeñas o de gran tamaño, hasta presentarse desprendimientos del elemento estructural poniendo en peligro a los habitantes de la construcción, dichas consecuencias

dependen de que tan avanzado este el proceso corrosivo dentro del elemento estructural ya que dependiendo de este se verá la afectación del mismo.

## **5. Recomendaciones**

El estudio del proceso corrosivo del acero de refuerzo en ambientes marinos es una temática que debe seguirse profundizando, con el fin de conocer más profundamente aspectos como la afectación mecánica que sufren los aceros de refuerzo al corroerse, los productos de corrosión más comunes que aparecen sobre estos y de este modo sensibilizar a ingenieros como a todos los que hacen parte de obras en las cuales se utilicen dichos elementos estructurales.

Para ello, se deberían considerar para futuras investigaciones de esta temática, el estudio de diferentes tipos de barras de acero con el fin de tener una amplia visión de esta temática, para así estudiar el comportamiento de cada una de estas barras en las primeras etapas del proceso corrosivo y así todas las repercusiones que trae a una estructura de concreto reforzado. Además, para futuras investigaciones en ensayos acelerados se deberían tomar tiempos de exposición más prolongados en el tiempo los cuales abarquen un mayor tramo del desarrollo del proceso corrosivo.

Así mismo se debe tener en cuenta que para la realización de estas pruebas se debe minimizar la exposición de las barras, previa la realización de las pruebas, al medio ambiente para evitar obtenerse resultados erróneos. De igual forma al concluir el ensayo de cámara de niebla salina se debe cubrir con un film plástico las barras con el fin de evitar que el medio ambiente acelere el proceso corrosivo y se deben almacenar en un sitio con baja humedad.

Para la realización del ensayo de cámara de niebla salina se recomienda el uso de entre 3 y 5 probetas por cada día de exposición para así abarcar la totalidad de pruebas tanto de caracterización como de cualquier ensayo adicional y si se requiere la repetición de alguna prueba por inconsistencia en los resultados o malos procedimientos existan probetas disponibles.

Al momento de la realización de pruebas como el ensayo a tracción, o determinación de la velocidad de corrosión se recomienda hacer dichas pruebas usando entre 2 y 3 probetas para cada tiempo de exposición, con el fin de corroborar que los resultados siguen una tendencia, hallan datos de desviación estándar y no exista alguna anormalidad en los resultados.

## 6. Referencias

American Society for Testing and Materials (ASTM B117) (2019). *American Society for Testing and Materials*. Recuperado el 09 de Marzo de 2020, de <https://www.astm.org/Standards/B117.htm>

International Organization for Standardization (ISO9226). (2012). *International Organization for Standardization*. Recuperado el 01 de Marzo de 2020, de <https://www.iso.org/standard/53502.html>

International Organization for Standardization (ISO9223). (2012). *International Organization for Standardization*. Recuperado el 01 de Marzo de 2020, de <https://www.iso.org/standard/53499.html>

Baorong H., Xiaogang L., Xiumin M., Cuiwei D., Dawei Z., Meng Z., Weichen X., Dongzhu L., & Fubin M. (2017). The cost of corrosion in China. *npj Mater Degrad* 1, 4 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2>

Xiaogang L., Dawei Z., Zhiyong L., Zhong L., Cuiwei D., Chaofang D. (2015). Materials science: Share corrosion data to prevent disasters, Xiaogang Li and colleagues call for open data infrastructures to collate information on materials failures. *Nature News*, 527, 441–442.

Koch G., Varney J., Thompson N., Moghissi O., Gould M., Payer J. (2016). International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. *NACE International*.

Papadopoulos M., Apostolopoulos C., Zervaki A., Haidemenopoulos G. (2011). Corrosion of exposed rebars, associated mechanical degradation and correlation with accelerated corrosion tests.

*Construction and Building Materials*, 25(8), 3367-3374.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.027>.

Almusallam A. (2001). Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars.

*Construction and Building Materials*, 15(8), 361-368. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00009-5)

Montoya P., Díaz I., Graniz N., De la Fuente D., Morcillo M. (2013). An study on accelerated corrosion testing of weathering steel. *Materials Chemistry and Physics*, 142(1), 220-228.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.07.009>.

Wu H., Lei H., Chen F., Quiao J. (2019). Comparison on corrosion behaviour and mechanical properties of structural steel exposed between urban industrial atmosphere and laboratory simulated environment. *Construction and Building Materials*, 211, 228-243.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.207>.

Austin S., Lyons R., Ing M. (2004). Electrochemical Behavior of Steel-Reinforced Concrete During Accelerated Corrosion Testing. *CORROSION*, 60(2), 203-212.

<https://doi.org/10.5006/1.3287722>.

Liu M., Cheng X., Li X., Hu J., Pan Y., Jin Z. (2016). Indoor accelerated corrosion test and marine field test of corrosion-resistant low-alloy steel rebars. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.09.005>.

Montoya P., Granizo N., De la Fuente D., Morcillo M., (2007). Evaluación y caracterización de la herrumbre de aceros autoprotectores (patinables) obtenida en diferentes ensayos acelerados de corrosión. *Scientia Et Technica*, 13(36), 531-536.

Papadopoulos M., Apostolopoulos C., Alexopoulos N., Pantelakis S. (2007). Effect of salt spray

corrosion exposure on the mechanical performance of different technical class reinforcing steel bars. *Materials & Design*, 28(8), 2318-2328. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.07.017>.

Calero J., Alcántara J., Díaz I., Simancas J., De la Fuente D., Morcillo M. (2017). Wet/dry accelerated laboratory test to simulate the formation of multilayered rust on carbon steel in marine atmospheres. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 52(3), 178-187. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2016.1244619>.

Artigas A., Monsalve., Sipos K., Bustos O., Mena J., Seco R., Garza-Montes-de-Oca N. (2015). Development of accelerated wet–dry cycle corrosion test in marine environment for weathering steels. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 50(8), 628-632. <https://doi.org/10.1179/1743278215Y.00000000007>.

Gonzalez J. (1989), *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. Madrid, España: Consejo superior de investigaciones científicas centro nacional de investigaciones metalúrgicas.

Morcillo M., Gonzalez B. (2018). La corrosión atmosférica del acero al carbono en ambientes costeros. Madrid, España: Consejo superior de investigaciones científicas centro nacional de investigaciones metalúrgicas.

Navarrete C., Salgado E., Celinda O. (2007). Determinación de la corrosividad atmosférica de las ciudades de Santo Domingo y Esmeraldas. Quito: QUITO/ EPN/ 2007.

Peña A., Rendón H. (2013). *Guía y tablas técnicas de los aceros*. Medellín, Colombia: Ferrocortes S.A.S.

Morcillo M., De la Fuente D., Díaz I., Cano H. (2011). Atmospheric corrosion of mild Steel. *Revista de metalurgia*, 47(5).



10.3989/revmetalm.1125

León-Bello F., Amaya-Malpica M. (2008). Acción galvánica superficial en una matriz de acero al carbono constituida por microceldas con granos de ferrita y perlita. *Revista mexicana de ingeniería química*. 7(1), 29-33.